



Mariana Osório Barros
Licenciada

Análise e dimensionamento de pavimentos mistos *slim floor*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Doutor Rodrigo Moura Gonçalves

Júri:

Presidente: Doutor António Manuel Pinho Ramos
Arguente: Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida
Vogal: Doutor Rodrigo Moura Gonçalves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2011

Copyright Mariana Osório Barros, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Rodrigo Gonçalves pela orientação e disponibilidade prestada, aconselhamento e conhecimentos transmitidos, no decorrer deste trabalho.

Aos meus queridos pais, irmãs, avós, padrinho e sobrinhas, aos quais não existem palavras suficientes para agradecer, por terem proporcionado a oportunidade de concluir o curso de Engenharia Civil nas melhores condições possíveis e por sempre terem acreditado e demonstrado todo o orgulho que se pode sentir.

Ao meu querido Miguel Vieira, José Vieira, Madalena Vieira e "Tias", um agradecimento especial, pelos momentos de descontração e felicidade proporcionados e apoio prestado ao longo deste trabalho e ao longo de 6 anos magníficos na presença de todos, que ficarão para sempre presentes na minha memória. Quando os momentos eram de desmotivação podia contar com esta bela família para levantar a moral. À cidade de Tomar pela magia e calma transmitidas e às pessoas que conheci nesta cidade. Ao Óscar Vieira pelos empurrões de motivação prestados.

Ao João Gamboias, Luís Dias, Filipa Marques, Linete Afonso, Telma Brás, Joana Wilton e João Nunes, colegas de faculdade e amigos, pelo apoio prestado, que me permitiu manter a concentração.

À Elsa Soares, Cristina Teixeira, Diogo Afonso, João Garrido, Catarina Parreirão e André Moreno pelo apoio e companheirismo ao longo destes anos de amizade.

Ao Diogo Brito, pela ajuda prestada na colocação de imagens no programa em MATLAB.

Abstract

In this paper, the analysis and design of composite steel-concrete slim floor systems is presented and discussed. In particular, one aims at contributing to the dissemination of this systems in Portugal. The origin, as well as the safety checking procedure, are presented in detail. A MATLAB tool for the safety checking of simply supported beams is developed and is subsequently employed to carry out a parametric study concerning the strength and behaviour of these beams.

Keywords:

- steel concrete composite beams
- slim floor
- safety checking
- BS 5950

Resumo

Neste trabalho, é apresentado e discutido a análise e dimensionamento de sistemas mistos *slim floor*. Em particular, pretende-se contribuir para a disseminação deste tipo de sistemas em Portugal. Tanto a origem do sistema, como a verificação da segurança, são apresentadas com detalhe. É desenvolvida uma ferramenta em MATLAB para a verificação da segurança e posteriormente aplicada num estudo paramétrico, tendo em conta a resistência e o comportamento destas vigas.

Keywords:

- vigas mistas aço-betão
- *slim floor*
- verificação da segurança
- BS 5950

Índice de Matérias

Copyright	3
Agradecimentos	5
Abstract	6
Resumo	9
Índice de Figuras	15
Índice de Tabelas	19
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	21
1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos da tese	2
1.3 Organização da tese	3
2 Pavimentos mistos <i>slim floor</i>	5
2.1 Enquadramento Histórico	5
2.2 Vantagens da utilização de pavimentos mistos <i>slim floor</i>	15
2.3 Aplicações	16
2.3.1 <i>Millennium Tower</i> (Viena, Austria, 1999)	16
2.3.2 Parque de estacionamento <i>DEZ</i> (Innsbruck, Austria)	19
2.3.3 <i>ING Bank</i> (Amesterdão, Holanda, 2002)	21
2.3.4 Edifício residencial (Baía de Cardiff, País de Gales, 2002)	22
3 Dimensionamento de pavimentos <i>slim floor</i>	25
3.1 Fase de Construção - estados limites últimos	27
3.1.1 Classificação de secções metálicas	27
3.1.2 Encurvadura lateral por flexão-torção	29
3.1.3 Combinação flexão-torção	35
3.1.4 Efeito das tensões biaxiais no banzo inferior	37
3.2 Secção mista - estados limites últimos	41
3.2.1 Classificação de secções mistas	41
3.2.2 Verificação da resistência à flexão	41
3.2.3 Conexão de corte	42

3.2.4	Armadura transversal	47
3.3	Secção mista - estados limites de serviço	48
3.3.1	Controlo de Deformações	48
3.3.2	Controlo de Vibrações	49
3.4	Programação em MATLAB	51
3.4.1	Exemplos de aplicação e validação do programa	55
4	Casos de Estudo	61
4.1	Estudo da resistência da secção mista à flexão	61
4.2	Análise de Resultados	62
4.2.1	Caso 1.1	62
4.2.2	Caso 1.2	64
4.2.3	Caso 2	67
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Desenvolvimentos futuros	75
	Bibliografia	77
A	Expressões de y_p e $M_{pl,Rd}$	79
A.1	Pavimento I-a	79
A.1.1	Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão	80
A.1.2	Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico	80
A.1.3	Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da secção I \ H	81
A.1.4	Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da secção I \ H	81
A.1.5	Caso 5-Linha neutra plástica no banzo inferior metálico	82
A.2	Pavimento I-b	83
A.2.1	Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão	83
A.2.2	Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico	84
A.2.3	Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IFB	85
A.2.4	Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga IFB	86
A.3	Pavimento II-a	88
A.3.1	Para $D_d = h_{eff}$, caso 1, 2, 3 e 4	88
A.3.2	Para $D_d = h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4	90
A.3.3	Para $D_d < h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4 e 5	91
A.4	Pavimento II-b (Ligação ao corte com conectores)	93
A.4.1	Para $D_d = h_{eff}$ caso 1, 2, 3, 4	93
A.4.2	Para $D_d = h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4	97
A.4.3	Para $D_d < h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4 e 5	99
A.5	Pavimento II-b (Ligação ao corte contínua)	102

B	Expressões para y_e e I_c	103
B.1	Pavimento I-a e II-a	103
B.1.1	Zona 1	104
B.1.2	Zona 2	104
B.1.3	Zona 3	105
B.2	Pavimento I-b e II-b	105
B.3	Pavimento II-b sem conectores	105

Índice de Figuras

1.1	Estruturas de pavimentos mistos.	2
2.1	Pavimento <i>Jack-arch</i>	5
2.2	Pavimento <i>Filler joist</i>	5
2.3	<i>Hatbeam</i> original	6
2.4	Variações da tipologia de viga <i>hatbeam</i>	7
2.5	<i>Universal Column</i> , pormenores de montagem do sistema <i>slim floor</i> .	8
2.6	Viga <i>Slimflor</i>	9
2.7	<i>Asymmetric Slimflor Beam</i>	9
2.8	Tipos de vigas IFB	10
2.9	Sistema <i>slim floor</i> Grupo <i>Arcelor</i>	10
2.10	Sistema <i>slimdek</i>	11
2.11	Fixação da chapa nervurada a um diafragma, sistema <i>slimdek</i>	11
2.12	Viga de extremidade RH SFB, sistema <i>slimdek</i>	12
2.13	Corte transversal numa viga secundária em <i>T</i>	12
2.14	Flexão local (flexão de <i>Vierendeel</i>), numa abertura rectangular . . .	13
2.15	Representação das aberturas na viga ASB.	13
2.16	Dimensões das aberturas na alma da secção [27].	14
2.17	<i>Millennium Tower</i> , Viena, plantas dos pisos.	17
2.18	Pórtico, <i>Millennium Tower</i> , Viena	18
2.19	Secção transversal do pavimento misto <i>slim floor</i>	18
2.20	Resistência da ligação laje-pilar, comparação do pavimento <i>slim floor</i> com um pavimento de betão	18
2.21	Secção transversal das colunas mistas	19
2.22	Modelo de análise global, <i>Millennium Tower</i> , Viena.	20
2.23	Secção transversal do pavimento misto <i>slim floor</i> , parque de estacionamento <i>DEZ</i> , <i>Innsbruck</i> -Austria	21
2.24	<i>ING Bank</i> (Amesterdão-Holanda)	22
2.25	Planta, edifício residencial em Cardiff, País de Gales	23
3.1	Pavimentos <i>slim floor</i> estudados no presente trabalho.	26
3.2	Definição das dimensões para a classificação das secções.	28
3.3	Definição do coeficiente α através da distribuição de tensões plásticas da secção.	29
3.4	Representação dos eixos de inércia nas secções IFB e SFB para a norma BS 5950.	30
3.5	Tabela para obtenção do valor de p_b para secções laminadas.	31

3.6	Tabela para obtenção do valor de p_b para secções soldadas.	32
3.7	Tabela para obtenção do valor de m_{LT}	34
3.8	Cargas actuantes - colocação de unidades pré-fabricadas (pavimento tipo I-a).	36
3.9	Cargas actuantes - betonagem na totalidade do compartimento (pavimento tipo II-a).	36
3.10	Pormenor do banzo inferior da viga SFB.	38
3.11	Distribuição de tensões plásticas no banzo inferior.	38
3.12	momento transversal M no banzo inferior metálico de viga ASB e SFB.	39
3.13	Influência da tensão longitudinal σ_1 na tensão de flexão transversal σ_2	40
3.14	Classificação da alma de acordo com a norma BS 5950: Parte 3.1.	41
3.15	Distribuição rectangular de tensões, Pavimento tipo I-b.	43
3.16	Distribuição rectangular de tensões, Pavimento tipo II-a.	44
3.17	Transferência de corte ao longo da superfície interna da viga metálica, Viga IFB tipo A.	46
3.18	fluxo de corte ao longo da viga longitudinalmente, Viga IFB tipo A.	46
3.19	Planos de rotura ao corte.	47
3.20	Interface gráfica para escolha da secção metálica e definição da suas propriedades.	52
3.21	Interface gráfica para verificação da resistência da secção mista em estados limites últimos.	53
3.22	Mensagens informativas.	54
3.23	Quadro de verificação da armadura de reforço transversal.	56
3.24	Interface gráfica para verificação da resistência da secção mista aos estados limites de serviço	57
3.25	Definição das dimensões do pavimento tipo I-a, Exemplo 1 (exemplo 3 da publicação [23]).	57
3.26	Definição das dimensões do pavimento tipo II-b, conexão por aderência, Exemplo 2 (exemplo da publicação [24]).	58
4.1	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a e I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G1).	64
4.2	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a e I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G2).	65
4.3	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo II-a e II-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=215$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G3).	66
4.4	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo II-a e II-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G4).	66
4.5	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), (perfis metálicos G1), Classe de betão C25/30 e C30/37.	68

4.6	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), (perfis metálicos G1), Classe de betão C25/30 e C30/37.	69
4.7	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G2), Classe de betão C25/30 e C30/37.	69
4.8	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G2), Classe de betão C25/30 e C30/37.	70
4.9	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=215$ mm), (perfis metálicos G3), Classe de betão C25/30 e C30/37.	70
4.10	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=215$ mm), (perfis metálicos G3), Classe de betão C25/30 e C30/37.	71
4.11	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G4), Classe de betão C25/30 e C30/37.	71
4.12	Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G4), Classe de betão C25/30 e C30/37.	72
A.1	Posições possíveis para a linha neutra plástica e definição da secção metálica SFB	79
A.2	Posições possíveis da linha neutra plástica e definição da secção metálica IFB	83
A.3	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3 e 4.	88
A.4	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3 e 4.	90
A.5	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5.	91
A.6	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4.	93
A.7	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4.	97
A.8	Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5.	99
B.1	Zonas de posição para a linha neutra, pavimento tipo I-a	103
B.2	Zonas de posição para a linha neutra, pavimento tipo II-a	104

Índice de Tabelas

3.1	Limites para a classificação da secção segundo a BS 5950: Parte 1 [10]	27
3.2	Limites para a classificação da secção segundo NP EN 1993-1-1 [13]	28
3.3	Comparação entre os resultados da publicação P110 e o programa em Matlab [23]	58
3.4	Comparação entre os resultados da publicação P175 e o programa em Matlab [24]	59
4.1	Grupos de perfis metálicos utilizados na parametrização da resistência à flexão da secção mista e definição da espessura total do pavimento	62

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e Siglas

ASB *Asymmetric Slimflor Beam*

ELS Estados Limites de Serviço

ELU Estados Limites Últimos

EC3 Eurocódigo 3

EC4 Eurocódigo 4

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

IFB *Integrated Floor Beam*

RHS *Rectangular Hollow Section*

SCI *Steel Construction Institute*

SFB *Slimflor Fabricated Beam*

UNL Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

Letras maiúscula latinas

A Área da secção metálica

A_a Área total de aço

A_b Área de armadura de reforço transversal por unidade de comprimento

A_{cv} Área da secção transversal de betão, por unidade de comprimento, da superfície de corte de betão

A_p Área do banzo metálico adicional

A_s Área da armadura da laje para momento negativo

A_t	Área de armadura de momento negativo por unidade de comprimento (mm/m)
A_{sv}	Área de corte da secção transversal, por unidade de comprimento (mm/m), da combinação da armadura de reforço superior e inferior, que atravessa a superfície de corte
D_d	Altura da chapa nervurada
D_{pc}	Altura da laje maciça
D_s	Altura de betão colocado <i>in situ</i> acima da chapa nervurada (pavimento tipo II) ou acima da laje de betão maciça (pavimento tipo I)
EI^+	Rigidez de flexão da viga na zona de momentos positivos
EI^-	Rigidez de flexão da viga na zona de momentos negativos
F_n	Força de ligação ao corte para a zona de momento máximo negativo
F_p	Força de ligação ao corte para a zona de momento máximo positivo
I_{cy}	Momento de Inércia do banzo à compressão segundo y-y (BS 5959: Parte 1)
I_{ty}	Momento de Inércia do banzo à tracção segundo y-y (BS 5959: Parte 1)
I_x	Momento de Inércia segundo o eixo "forte"(BS 5959: Parte 1)
I_y	Momento de Inércia segundo o eixo "fraco"(BS 5959: Parte 1)
η	Coefficiente de encurvadura lateral do banzo (BS 5959: Parte 1)
J	Factor de rigidez à torção
M	Momento transversal actuante no banzo inferior metálico
M_0	Momento máximo aplicado na viga simplesmente apoiada
M_b	Momento resistente à encurvadura por flexão-torção (BS 5959: Parte 1)
$M_{b,Rd}$	Momento resistente à encurvadura por flexão-torção (NP EN 1993-1-1)
M_{bp}	Momento plástico resistente do banzo inferior metálico
M_{cr}	Momento elástico crítico de encurvadura por flexão-torção
$M_{pl,Rd}$	Momento plástico resistente da secção mista
M_x	Momento actuante segundo a direcção x-x
M_y	Momento actuante no banzo superior metálico segundo a direcção y-y
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento actuante na secção mista
Q_k	Força resistente característica dos conectores de corte

- Q_n Valor de cálculo da força resistente dos conectores de corte para a região de momentos negativos
- Q_p Valor de cálculo da força resistente dos conectores de corte para a região de momentos positivos
- R_c Força resistente do betão comprimido
- R_p Força Resistente do banzo metálico adicional
- R_s Força resistente da secção de aço
- S_x Módulo de flexão plástico (BS 5959: Parte 1)
- $S_{x,red}$ Módulo de flexão plástica reduzido tendo em conta a flexão transversal no banzo inferior
- V_{Ed} Valor de cálculo do esforço actuante na secção mista
- $W_{pl,y}$ Módulo de flexão plástico (NP EN 1993-1-1)

Letras minúsculas latinas

- b Largura do banzo da secção metálica
- b_c Largura do banzo à compressão
- b_{eff} Largura efectiva do banzo de betão
- b_b Largura do banzo inferior (área sólida de betão)
- b_p Largura do banzo adicional da secção metálica
- b_r Largura da nervura de betão adjacente à viga (lajes mistas)
- b_s Espaçamento da nervura
- b_t Largura do banzo à tracção
- d_h Diâmetro da cabeça do conector
- f_{cu} Tensão resistente característica do betão em provetes cúbicos
- f_y Tensão de cedência do aço (EN 1993-1-1). Tensão de cedência característica dos varões de aço (BS 5950: Parte 3.1)
- h Altura do conector de corte
- h_{eff} Altura efectiva da secção metálica
- m_{LT} Factor de momento uniforme equivalente
- n Factor de correcção da esbelteza (BS 5959: Parte 1)
- p Carga permanente

- p_b Tensão de resistência à flexão (BS 5959: Parte 1)
- p_y Valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural
- q Sobrecarga
- r Raio de concordância (secções laminadas)
- r_1 Rácio de tensões na alma
- r_s Factor de redução devido à media de corte em uma nervura
- s Espaçamento longitudinal entre conectores
- s_t Espaçamento transversal entre eixo de conectores
- t_c Espessura do banzo à compressão
- t_f Espessura do banzo da secção metálica
- t_p Espessura do banzo adicional da secção metálica
- t_t Espessura do banzo à tracção
- t_w Espessura da alma da secção metálica
- u Parâmetro de encurvadura (BS 5959: Parte 1)
- x Índice de torção (BS 5959: Parte 1)
- y_p Posição da linha neutra plástica da secção mista em relação ao topo da secção
- z extensão da colocação das unidades pré-fabricadas ou da betonagem *in situ* ao longo da viga *slim floor*

Letras minúsculas gregas

- α_{LT} Factor de imperfeição (NP EN 1993-1-1)
- δ Máxima deformação na viga
- δ_0 Deformação a meio-vão para uma viga simplesmente apoiada, com o comprimento do vão e carregamento iguais ao de uma viga contínua
- δ_w Média ponderada das deformações na viga
- δ_p Máxima deformação na viga para as cargas permanentes
- δ_q Máxima deformação na viga para as sobrecargas
- δ_{tot} Máxima deformação na viga para a carga total não majorada
- ϵ Constante, $\sqrt{\frac{275}{p_y}}$ BS 5950: Parte 1. $\sqrt{\frac{275}{f_y}}$ EN 1992-1-1

λ Esbelteza

λ_{LT} Esbelteza equivalente, para a encurvadura por flexão-torção (BS 5959: Parte 1); esbelteza adimensional (NP EN 1993-1-1)

ν Factor de esbelteza (BS 5959: Parte 1); Força de corte longitudinal, por unidade de comprimento

ν_r Resistência ao corte longitudinal, por unidade de comprimento

σ_1 Tensão longitudinal devido à flexão global da secção

σ_2 Tensão por flexão transversal do banzo inferior metálico

ϕ Diâmetro

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

Uma estrutura mista é composta por dois ou mais materiais que interagem entre si, aproveitando as qualidades de ambos tanto ao nível da capacidade resistente como ao nível do comportamento em serviço [18]. Segundo Calado e Santos [17], uma estrutura mista é resultante da aplicação de vários materiais, como o aço, o betão armado ou outros. Contudo, no âmbito da presente dissertação, tratam-se apenas estruturas mistas aço-betão. Actualmente, a construção mista aço-betão regista-se no campo dos edifícios habitacionais/comerciais, como também em pontes e viadutos, tornando-se atractiva ao nível da diminuição de custos quando comparada com a construção em betão armado, devido à menor dimensão dos elementos, menor peso total e maior rapidez na construção [18, 1].

Este trabalho aborda a verificação de segurança de vigas mistas aplicadas a um tipo de pavimentos denominado *slim floor* que, como o próprio nome indica, são pavimentos de espessura reduzida. A principal diferença entre este tipo de pavimentos e a construção mista convencional consiste precisamente nesta característica. Nos pavimentos mistos convencionais (Figura 1.1(a)), a laje de betão apoia no banzo superior da viga metálica e a altura total do pavimento corresponde à soma da espessura da laje com a altura da viga metálica [18]. Nos pavimentos tipo *slim floor* (Figura 1.1(b)), são utilizadas vigas metálicas com altura reduzida e banzo inferior com uma maior largura que o superior, de modo que laje possa aí apoiar. Desta forma, a viga permanece inserida na espessura de betão, o que permite diminuir a altura total do pavimento [1, 15]. No entanto, a redução da altura do pavimento leva a uma maior flexibilidade, sendo necessária a avaliação cuidada do seu comportamento em serviço, principalmente em termos do controlo de deformações [18].

Segundo a norma EN 1994-1-1 (EC4, [12]), a acção mista é efectuada através da ligação ao corte com conectores (ligação mecânica) de modo a limitar o deslizamento entre os dois materiais, entre o banzo superior metálico e o banzo

efectivo de betão, e ainda entre a alma e o revestimento de betão, no caso de vigas parcialmente betonadas (Figura 1.1(c)). No entanto, nos pavimentos tipo *slim floor*, existe a possibilidade de ocorrer acção mista sem a utilização de conectores, considerando-se que os dois materiais trabalham em conjunto devido à força de ligação mobilizada na interface [26]. Estes pavimentos, podem ser dimensionados através do EC4 apenas com base em ensaios. Por outro lado, as publicações do Steel Construction Institute [23, 24, 25] estabelecem o dimensionamento de sistemas *slim floor* com base na norma BS 5950: parte 3.1, pelo que serão utilizadas ao longo deste trabalho.

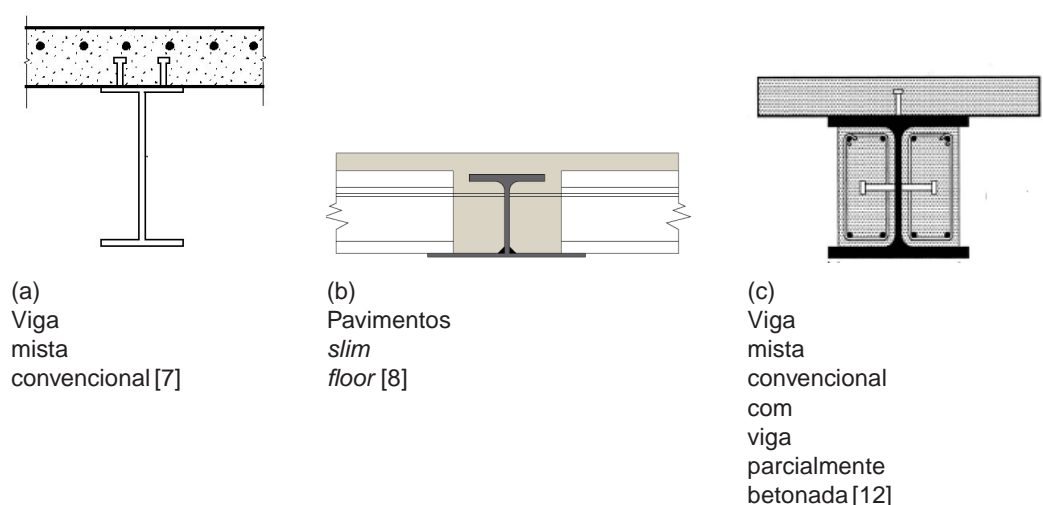


Figura 1.1: Estruturas de pavimentos mistos.

Assim, os principais trabalhos utilizados nesta dissertação, foram as publicações P110, P175 e P248 do SCI e a norma BS 5950: parte 3.1, que tratam do dimensionamento de sistemas mistos *slim floor* [23, 24, 25, 11].

1.2 Objectivos da tese

O principal objectivo desta dissertação consiste em contribuir para a divulgação do sistema estrutural misto *slim floor* em Portugal, uma vez que a sua utilização no nosso país é residual ou mesmo inexistente (a autora não encontrou registos da sua utilização). Este sistema apresenta algumas peculiaridades, as quais são discutidas ao longo deste trabalho, que o tornam por vezes vantajoso em relação aos sistemas convencionais.

A utilização deste sistema regista-se em países como a Espanha, Holanda, Alemanha, Reino Unido e países nórdicos, principalmente em edifícios comerciais/escritórios e de habitação, tendo-se também verificado a sua utilização em parques de estacionamento [23, 24, 25, 18].

Para além do que foi referido, pretende-se efectuar uma comparação dos tipos de sistemas *slim floor* quanto à sua resistência (ao estados limites últimos, ELU) e ao comportamento em serviço (estados limites de serviço, ELS). Para tal, desenvolveu-se um programa de cálculo automático que verifica a resistência da secção mista à flexão e fornece o valor da rigidez de flexão da viga e todos os dados necessários para o cálculo das frequências naturais e deformações.

1.3 Organização da tese

No Capítulo 2 apresenta-se a origem, evolução e as várias tipologias do sistema *slim floor* ao longo dos tempos, como também as vantagens quando comparado com o sistema convencional misto. São descritas algumas aplicações do sistema em edifícios existentes.

No Capítulo 3 são apresentados os quatro tipos de pavimentos estudados, os tipos de conexão ao corte utilizados e o processo de cálculo para a verificação da segurança quanto aos estados limites últimos e de serviço, para a fase de construção e acção mista aço-betão. É apresentado um programa original, efectuado em MATLAB, que permite a verificação da segurança para secções mistas do tipo *slim floor*.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados de estudos paramétricos quanto à resistência dos quatro tipos de pavimentos descritos no Capítulo 3.

No Capítulo 5 são referidas as conclusões principais a retirar do estudo efectuado, assim como são mencionados alguns dos possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Pavimentos mistos *slim floor*

2.1 Enquadramento Histórico

A principal característica dos pavimentos *slim floor* consiste na inserção das vigas de suporte na altura total do pavimento. As primeiras aplicações ocorreram na década de 1790-1800 com a utilização dos sistema de pavimento *jack-arch*. Este sistema consistia na utilização de arcos compostos por blocos cerâmicos suportados pelo banzo inferior de vigas de ferro fundido (Figura 2.1) [9, 21]. No século XIX aparece outra forma de pavimento *slim floor* intitulada de *filler joist* (ou *joist concrete*), que consistia na utilização de vigas de aço com um espaçamento entre 0.6 a 1.2 m (podendo ser inferior), sendo posteriormente colocado o betão de modo a que o nível inferior do pavimento permanecesse ao nível ou abaixo do banzo inferior da viga de aço (Figura 2.2) [9, 21].



Figura 2.1: Sistema *Jack-arch* [9].

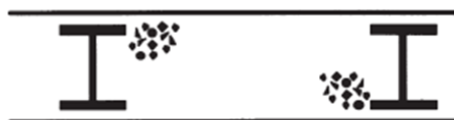


Figura 2.2: Sistema *Filler joist* [9].

Os princípios do sistema de pavimentos *slim floor* foram mais desenvolvidos e utilizados a partir de meados do século XX, devido às suas principais vantagens, como a redução da espessura do pavimento, diminuição do tempo de construção

e mão de obra e consequente diminuição de custos. Com o objectivo de reduzir a espessura total do pavimento, é utilizada uma viga de aço cujo banzo inferior possui uma maior largura que o banzo superior e a sua altura é igual ou inferior à espessura do pavimento, de modo a que a laje de betão armado seja suportada pelo banzo inferior e a viga fique inserida na totalidade da altura do pavimento. A diminuição da espessura é possível em virtude da acção mista aço-betão. Outro factor adjuvante da diminuição da espessura do pavimento consiste na ligação contínua entre vãos, mobilizando momento negativo nos apoios e consequentemente, diminuindo o momento máximo positivo [19].

Nos anos 80 do século XX registou-se uma grande utilização deste tipo de sistema nos países nórdicos. No início dos anos 90, nestes países e no Reino Unido, registou-se mesmo um crescimento na indústria da construção metálica impulsionado pela grande utilização de sistemas *slim floor* com vigas metálicas do tipo *hatbeam* [18, 23]. Originalmente, a viga *hatbeam* consistia na soldadura de quatro chapas metálicas, duas verticais e duas horizontais, conferindo-lhe a forma de "chapéu" como o próprio nome indica (Figura 2.3) [23].

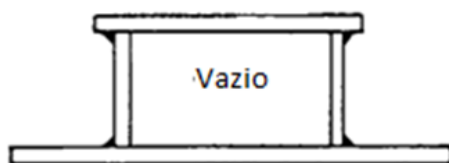


Figura 2.3: *Hatbeam* original [23].

Outros tipos de vigas *hatbeam*, utilizadas nestes países, resultam da evolução da *hatbeam* original. Na Figura 2.4(a) podemos observar uma secção consistindo em duas secções em *T* soldadas através dos seus banzos. As almas das secções em *T* apresentam-se alinhadas com a vertical e, na extremidade das mesmas, horizontalmente, é soldada uma chapa metálica [23].

A secção da Figura 2.4(b) é constituída por 3 secções em *T*, diferindo da anterior no facto de a chapa horizontal ser substituída por uma secção em *T* de forma que o vazio existente é dividido pela alma da secção em *T* em duas células [23].

Na Figura 2.4(c) representa-se um outro tipo de variação da *hatbeam*, diferindo das secções representadas nas Figuras 2.4(a) e 2.4(b) por não utilizar perfis em *T* na constituição da secção. Esta viga torna-se mais fácil de fabricar, pois consiste apenas na utilização de um perfil em *H* com a alma na horizontal e uma chapa soldada por baixo e no topo do perfil [23].

A *Thor-beam* (Figura 2.4(d)), comercializada no início dos anos 90 do séc. XX no Reino Unido pela empresa *ConstrucThor*, consiste na utilização de duas secções em U com uma chapa soldada aos banzos inferiores. Nos banzos superiores são colocadas pequenas chapas longitudinais ligadas por cantoneiras, espaçadas de determinada distância. Estas cantoneiras servem para transferir as forças horizontais ao betão, contribuindo para a acção mista [23].

A tipologia da *Deltabeam* (Figura 2.4(e)) foi desenvolvida na Finlândia nos anos 90 do séc. XX e é constituída por 4 chapas metálicas soldadas entre si, ficando com a forma de um *delta*, como o próprio nome indica. Nas almas são efectuados orifícios de grande diâmetro ao longo de toda a viga [6].

Por fim, a viga metálica RHS SFB (Figura 2.4(f)) consiste na utilização de uma secção do tipo RHS (*Rectangular Hollow Section*) com uma chapa soldada na zona inferior. Desta forma, é possível fabricar uma viga semelhante à *hatbeam* original de forma mais prática e económica .

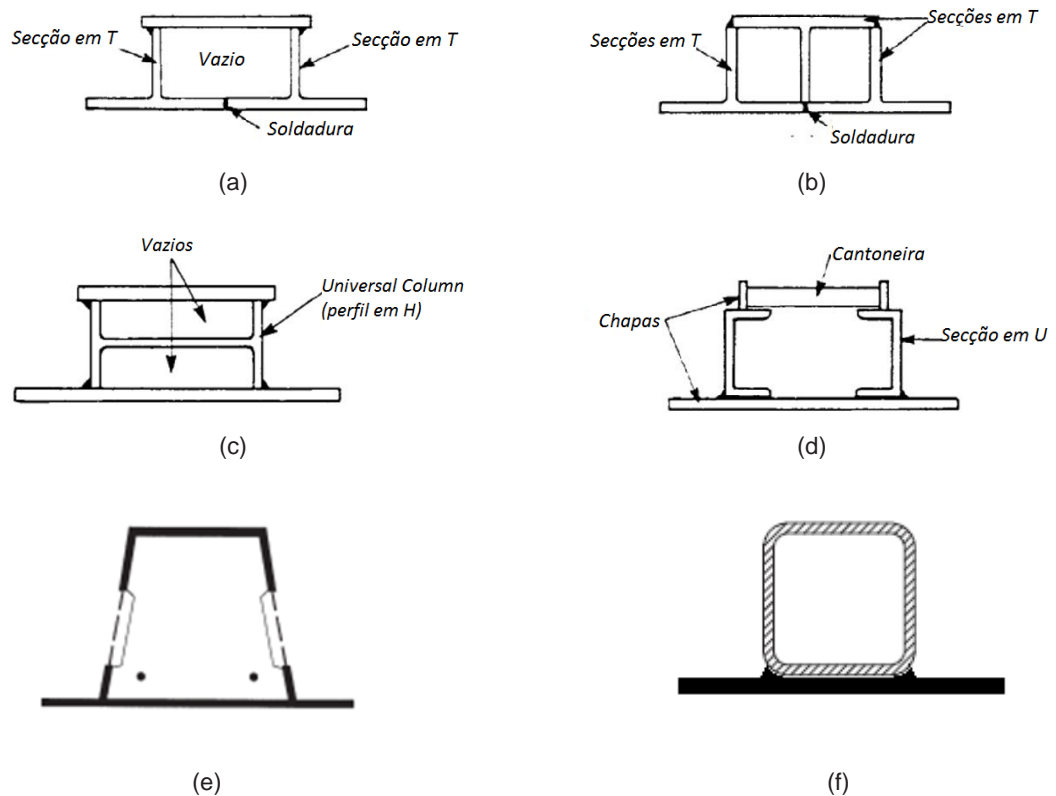


Figura 2.4: Variações da tipologia de viga *hatbeam*.

Outro tipo de viga utilizado neste sistema é a *Universal Column* (UC) (Figura 2.5).

Para facilitar a montagem das lajes pré-fabricadas, deve ser efectuado um corte no extremo das lmesma, ou então, é necessário recortar metade da largura dos banzos superiores [23].

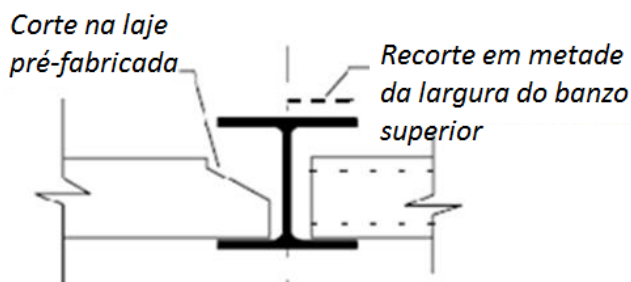


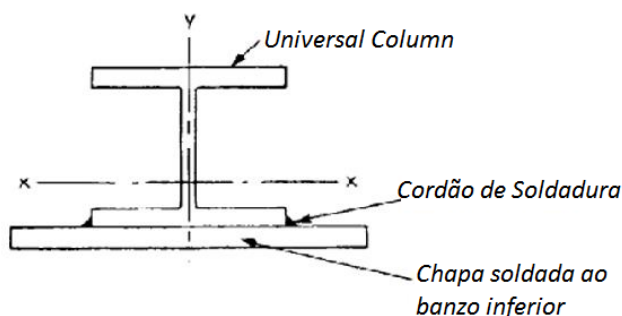
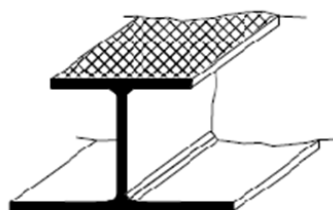
Figura 2.5: *Universal Column*, pormenores de montagem do sistema *slim floor* [23].

Nas secções das vigas representadas nas Figuras 2.4(a), 2.4(b) e 2.4(c) verifica-se a impossibilidade de proceder ao preenchimento do seu interior com betão. Tal facto já não se verifica nas secções das Figuras 2.4(d) e 2.4(e) devido a aberturas existentes que facilitam a entrada do betão no interior da secção.

No início dos anos 90 do séc. XX, existiu um crescente interesse no Reino Unido na utilização e desenvolvimento deste sistema [18]. As secções usadas nesta época eram as representadas na Figura 2.4(d). Em 1992, a *British Steel* (actual *Tata Steel*) e o *Steel Construction Institute* (SCI) juntaram-se na intenção de investigar novas possibilidades, tendo sido desenvolvido um novo tipo de viga, intitulada *Slimflor Fabricated Beam* (SFB) (Figura 2.6) [23]. Esta secção consiste na utilização de uma *Universal Column* com uma chapa soldada ao banzo inferior com uma maior largura. Desta forma, as lajes de betão pré-fabricadas, ou lajes mistas, assentam na chapa adicional, não sendo necessário efectuar os recortes nas lajes ou no banzo superior anteriormente referidos [23, 25].

Em 1997, com a evolução da tecnologia da produção de perfis laminados, foi desenvolvido pela *British Steel* e o SCI um perfil laminado intitulado *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), em que o banzo inferior tem uma largura maior que o banzo superior. Adicionalmente, são realizadas nervuras no banzo superior de forma a garantir uma melhor aderência com o betão (Figura 2.7). Verifica-se que o perfil laminado apresenta uma redução de peso de cerca de 15% a 25% quando comparado com a viga *Slimflor*, mas também uma diminuição de gastos no fabrico da mesma, o que torna esta solução mais económica [24].

A empresa *ARBED* (actual grupo *Arcelor*), desde 1991 que procura desenvolver

Figura 2.6: Viga *Slimflor* [23].Figura 2.7: *Asymmetric Slimflor Beam*.

um sistema *slim floor*. Como consequência, surge o perfil *Integrated Floor Beam* (IFB), que é actualmente produzido pela empresa [18]. Existem dois tipos de vigas IFB: Tipo A e Tipo B. O processo de fabrico da viga IFB tipo A consiste no corte de um perfil em *H* ou *I* a meio, ficando com a forma de uma secção em *T*. Posteriormente solda-se à alma uma chapa com largura superior à do banzo do perfil. A viga IFB do tipo B, tem um processo semelhante no facto de também se utilizar a metade de um perfil em *I* ou *H*, ficando com a forma de uma secção em *T* invertida, soldando-se à alma uma chapa com uma largura inferior à do banzo do perfil (Figura 2.8) [8]. O sistema estrutural concebido por esta empresa, consiste na utilização de vigas do tipo IFB, pilares metálicos e lajes pré-fabricadas alveolares pré-esforçadas (Figura 2.9), onde a laje pré-fabricada é suportada pelo banzo inferior da viga [4]. Posteriormente é efectuada a betonagem, de forma a preencher os espaços entre a viga metálica e a laje. Alternativamente, podem ser utilizadas lajes mistas nervuradas ou lajes de betão maciças [18].

O sistema *Slimdek* (Figura 2.10) surge também em 1997, desenvolvido pelo SCI e pela *British Steel*, que consiste na utilização de lajes mistas constituídas por uma chapa nervurada que funciona como cofragem colaborante. Neste sistema podem ser utilizadas as vigas ASB e/ou RH SFB [24, 27]. Em relação às lajes pré-fabricadas, neste sistema verifica-se uma redução do peso próprio do pavimento e a possibilidade de se utilizar o espaço entre nervuras da laje para a passagem de instalações de serviço, inserindo-as dentro da altura do pavimento. A chapa nervurada utilizada é o modelo SD Comflor 225 (*Tata Steel*)

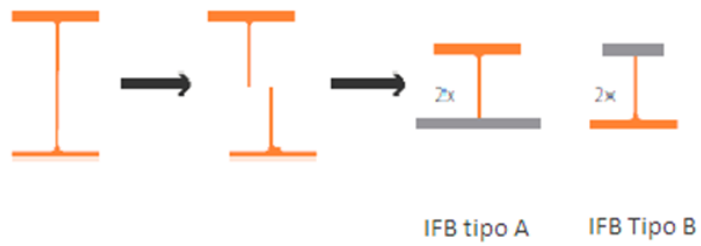


Figura 2.8: Tipos de vigas IFB [8].

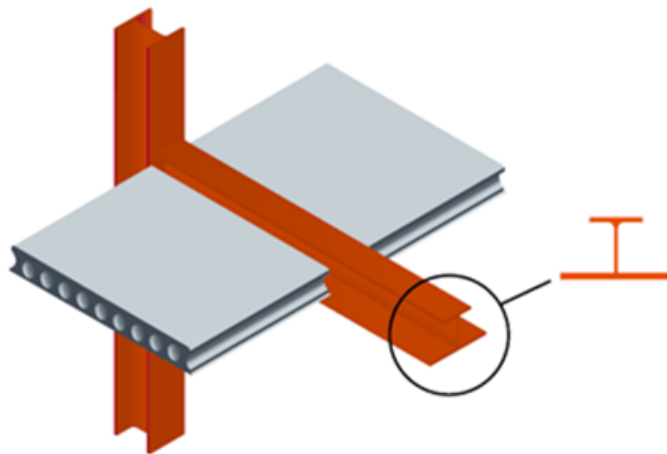


Figura 2.9: Sistema *slim floor* Grupo Arcelor [4].

com maior altura, a qual pode alcançar até 6.5 m de vão sem escoramentos temporários ou 9.5 m com escoramentos. As nervuras da chapa estão orientadas perpendicularmente à viga *slim floor* e a chapa é suportada pelo banzo inferior da viga [24, 27]. Para fixá-la, são fixados diafragmas à viga metálica, através da técnica *shot fire*, como se pode observar na Figura 2.11.

Neste sistema são utilizadas as vigas RH SFB como vigas de extremidade (Figura 2.12) que, devido à sua geometria tubular, comportam-se melhor à torção provocada pelas cargas excêntricas [27]. Para a estrutura adquirir a resistência necessária, é usual colocar vigas secundárias (*tie members*) perpendicularmente à vigas *slimfloor*. Normalmente, são usadas vigas com secção em *T* ou secções RHS (Figura 2.13). Estas vigas não têm função de resistir a qualquer carga aplicada na laje. Para evitar a flexão da viga deve ser considerada uma altura no mínimo de $L/40$ [27].

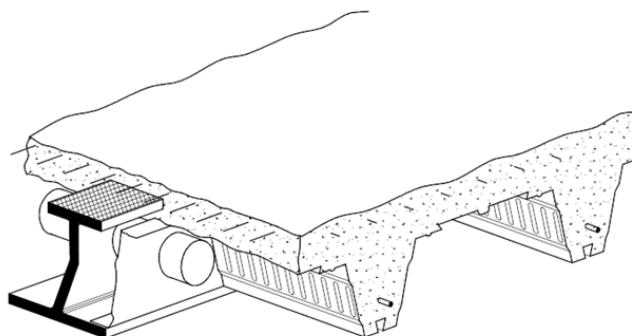


Figura 2.10: Sistema *slimdek* [24].

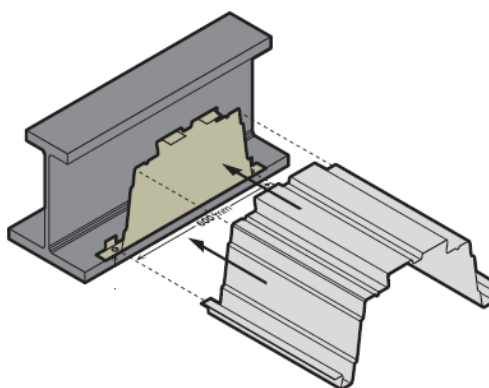


Figura 2.11: Fixação da chapa nervurada a um diafragma, sistema *slimdek* [27].

É comum obter pavimentos com alturas entre 290 a 320 mm com a utilização da viga 280 ASB, e entre 315 a 370 mm com a utilização da viga 300 ASB [27]. Por

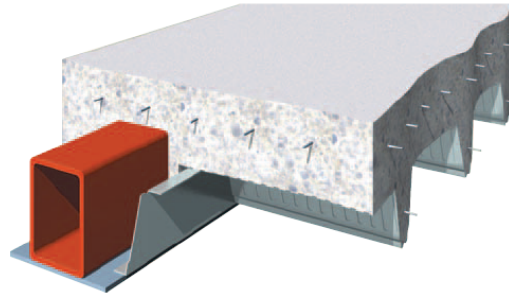


Figura 2.12: Viga de extremidade RH SFB, sistema *slimdek* [27].

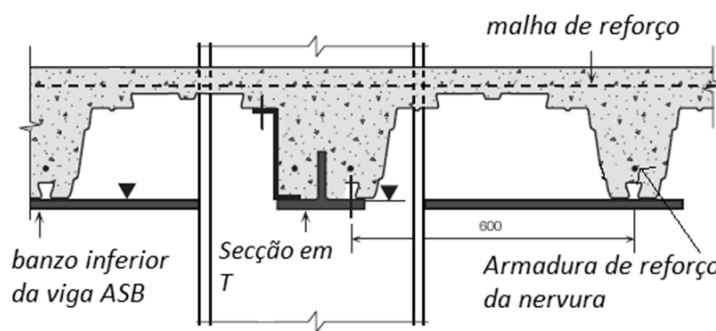


Figura 2.13: Corte transversal numa viga secundária em T [27].

outro lado, a resistência ao fogo depende da espessura da laje, como também da quantidade de armadura colocada nas nervuras, uma vez que se considera que a chapa nervurada não tem resistência ao fogo. Para além da armadura colocada nas nervuras, é necessário colocar armadura para o controlo da fendilhação da laje, na face superior [27].

Para este tipo de pavimentos foi possível demonstrar que existe uma continuidade parcial da laje na zona de ligação à viga, que permite uma redução de cerca de 20% nas deformações da laje. De qualquer forma, a continuidade parcial deve ser ignorada na verificação da resistência da laje mista [27].

Neste tipo de sistemas é possível a criação de aberturas na alma, como também nos diafragmas da chapa nervurada, de modo a efectuar a passagem necessária para instalação de equipamentos. Estas aberturas têm forma circular ou oval e nelas são colocadas mangas e posteriormente tubos com um determinado diâmetro (Figura 2.15). Estas aberturas podem influenciar negativamente a resistência ao corte vertical. Por outro lado, testes demonstraram que betão envolvente à alma permite a obtenção de uma resistência ao corte considerável nesta zona. A transferência do esforço de corte através das aberturas efectuadas pode causar flexão local (flexão de *Vierendeel*, Figura 2.14) nas ligações da alma

com os banzos, adjacentes às aberturas. Desta forma, é definida uma dimensão máxima das aberturas, obtida através de ensaios realizados (Figura 2.16). Estes efeitos são menos significativos quando as linhas neutras plástica e elástica se encontram próximas das aberturas [27, 3].

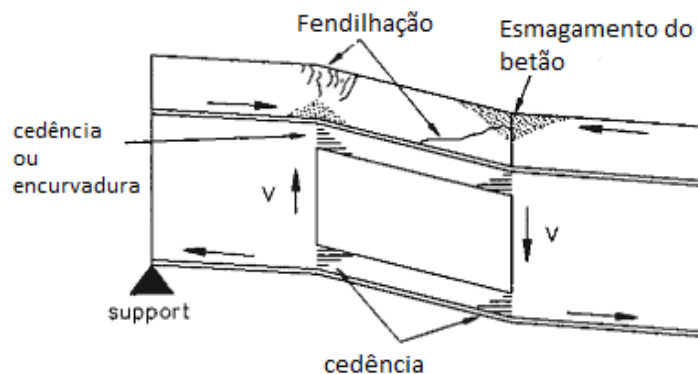


Figura 2.14: Flexão local (flexão de Vierendeel), numa abertura rectangular [27].

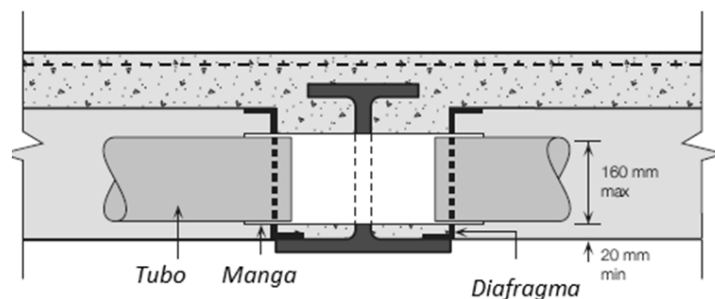


Figura 2.15: Representação das aberturas na viga ASB [27].

Em 1997 no mesmo ano em que surgiu o sistema *slimdek*, Yeadon e Horton projectam três edifícios com o sistema *arched metal deck*. Este sistema é uma evolução do sistema *jack-arch* e consiste na utilização de uma chapa nervurada em forma de arco, suportada pelo banzo inferior da viga metálica. Posteriormente, procede-se à betonagem, onde a chapa serve de cofragem colaborante. O betão utilizado pode ser leve ou de peso normal, ou até uma combinação dos dois com o objectivo de reduzir o peso próprio actuante na chapa nervurada, de modo a otimizar a sua forma arqueada. São utilizadas normalmente vigas do tipo *Universal Column* (perfil UC) ou *Universal Beam* (perfil em I), com uma chapa trapezoidal com 60 mm de altura, vencendo um vão de 7,5 m [14].

As principais vantagens do sistema *arched metal deck* em relação ao sistema misto convencional e aos restantes sistemas *slim floor* consistem na possibilidade

2.2. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS MISTOS *SLIM FLOOR* 15

de vencer vãos maiores devido à forma arqueada da chapa trapezoidal, na maior rapidez de construção e na redução de custos decorrente da menor necessidade de providenciar escoramento [14].

2.2 Vantagens da utilização de pavimentos mistos *slim floor*

Interessa definir as vantagens da utilização do sistema *slim floor* em relação ao sistema misto convencional:

- Redução da altura total do pavimento. Esta redução é significativa em relação aos pavimentos mistos convencionais. Um edifício construído com *slim floor*, com a mesma altura que um edifício construído com o sistema convencional misto, pode chegar a ter mais um andar devido à redução da altura do pavimento. Esta possibilidade é bastante útil em zonas onde existem restrições quanto à altura máxima dos edifícios [18, 23];
- Aumento da resistência ao fogo e à corrosão da secção metálica devido ao revestimento da mesma com betão. Desta forma, pode não ser necessário o uso de protecção adicional contra o fogo nos elementos metálicos, à excepção do banzo inferior, que se encontra exposto [18, 23];
- O sistema *slim floor* demonstra ter uma maior rapidez de execução e menores custos, tanto ao nível da aplicação de lajes pré-fabricadas como de lajes mistas. O facto de se poder montar a estrutura porticada (viga-pilar) sem qualquer colocação de cofragens, diminui significativamente o tempo de montagem e os custos associados. No caso de uso de lajes pré-fabricadas, a própria laje serve de cofragem à camada de revestimento superior. No caso do uso de laje mista, a chapa nervurada também funciona como elemento de cofragem colaborante. O facto de a viga estar integrada na altura total do pavimento diminui as irregularidades no intradorso do pavimento mais, diminuindo a quantidade de acabamentos necessários. Todos estes aspectos diminuem o tempo total de montagem da estrutura e os custos de cofragem e mão de obra [18, 23].
- Estes sistemas, principalmente aqueles em que são aplicadas lajes mistas, permitem a colocação de equipamento técnico entre as nervuras da laje [18, 23, 8];
- O revestimento de betão em torno da viga metálica permite tirar partido da acção mista estabelecida através da ligação ao corte, tanto ao nível dos estados limites últimos como dos estados limites de serviço [18, 23];
- No caso de se usar lajes pré-fabricadas alveolares ou o sistema *slimdek*, consegue-se obter um melhor isolamento térmico e acústico do que com lajes maciças com a mesma espessura. Isto deve-se à existência de espaços de ar que aumentam a resistência à transferência de calor e propagação sonora [8];

- Criação de espaços abertos com um número reduzido de colunas. As vigas podem chegar até aos 8 metros de vão, enquanto que as lajes podem ter vãos entre 10 e 12 metros [8];
- Constitui uma solução mais leve que as soluções de betão armado e que os sistemas mistos convencionais [24, 8, 9].

2.3 Aplicações

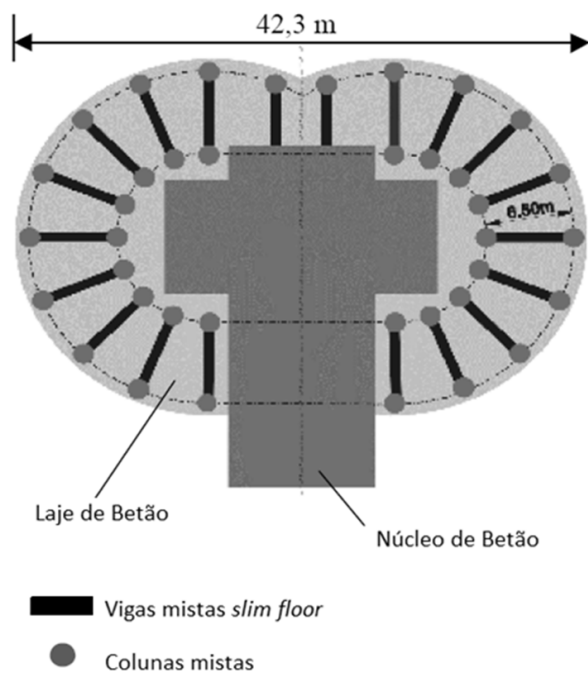
2.3.1 Millennium Tower (Viena, Austria, 1999)

Um exemplo importante da utilização do sistema *slim floor* é a *Millennium Tower* em Viena, com 55 andares, perfazendo uma altura de 202 metros e com uma área de implantação de 1000 m^2 . Este edifício foi concluído em apenas 8 meses, devendo-se a sua rápida conclusão aos métodos de construção utilizados. Como se pode observar na Figura 2.17, o pavimento é geometricamente composto por dois círculos sobrepostos. Na extremidade dos mesmos encontram-se 20 colunas distanciadas de 1 m das fachadas e espaçadas de 5,2 m. A uma distância concêntrica de 6,5 m das colunas da extremidade, encontram-se as colunas internas, as quais são espaçadas de 2,7 m [1, 16].

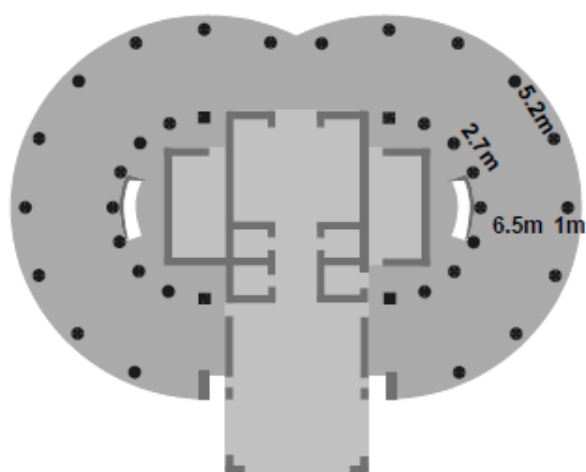
Neste edifício foram utilizadas ligações semi-contínuas (rigidez da ligação, situação intermédia entre rigidez nula e infinitamente rígida) entre as vigas *slim floor* e as colunas tubulares (Figura 2.18), permitindo a mobilização de momento na ligação e, conseqüentemente a diminuição dos momentos positivos da laje, das vibrações e deformações. Por este motivo, foi possível diminuir a espessura da laje para apenas 19 cm, reduzindo-se o peso próprio e conseqüentemente a quantidade de material utilizado, fundações, fachada e custos inerentes [1, 16].

O facto de se ter usado o sistema *slim floor* permitiu a diminuição da espessura do pavimento, obtendo-se tectos planos que facilitam a instalação das tubagens de serviço [16]. Como se pode observar na Figura 2.19, a viga *slim floor* utilizada é um perfil em *T* invertido e a ligação ao corte é efectuada através de conectores [16].

As colunas também são elementos mistos, como se pode observar na Figura 2.21. A combinação de colunas mistas com vigas *slim floor* aumenta a ductilidade da estrutura, melhorando comportamento da estrutura quanto ao punçoamento e à flexão. Numa estrutura fungiforme de betão armado equivalente, o fenómeno do punçoamento e a flexão, são mais problemáticos devido à estrutura ter uma ductilidade inferior (Figura 2.20) [16].



(a) [1]



(b) [16]

Figura 2.17: *Millennium Tower*, Viena, plantas dos pisos.

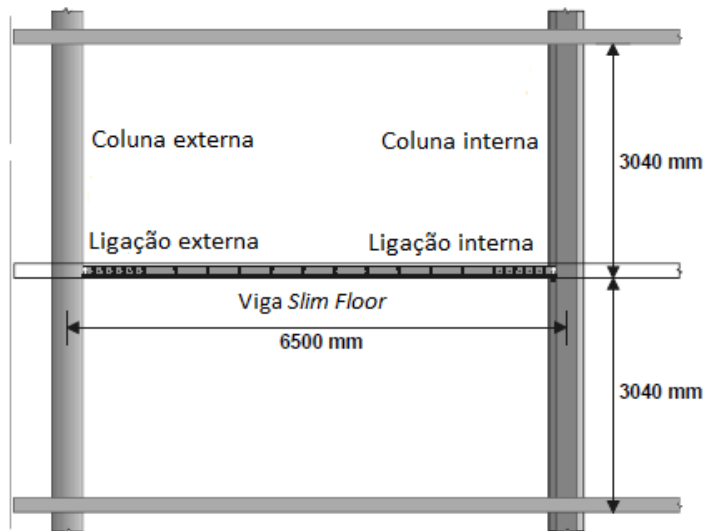


Figura 2.18: Pórtico, *Millennium Tower*, Viena [16].

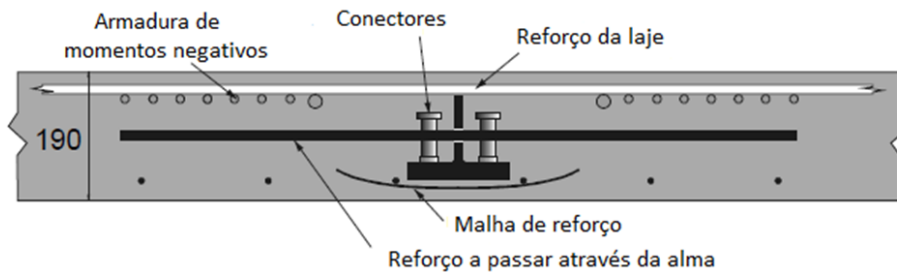


Figura 2.19: Seção transversal do pavimento misto *slim floor* [16].

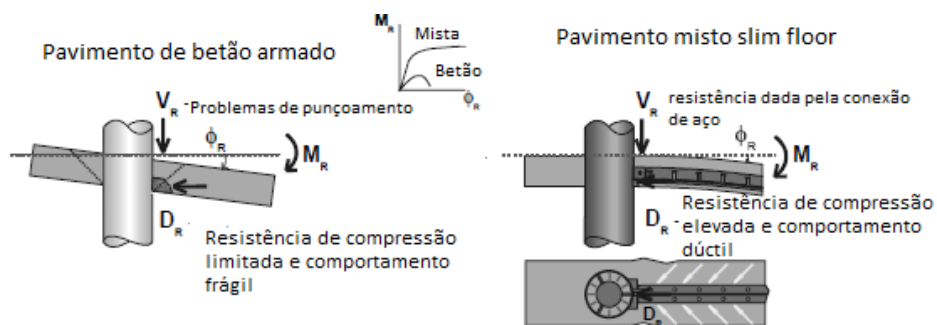


Figura 2.20: Resistência da ligação laje-pilar, comparação do pavimento *slim floor* com um pavimento de betão [16].

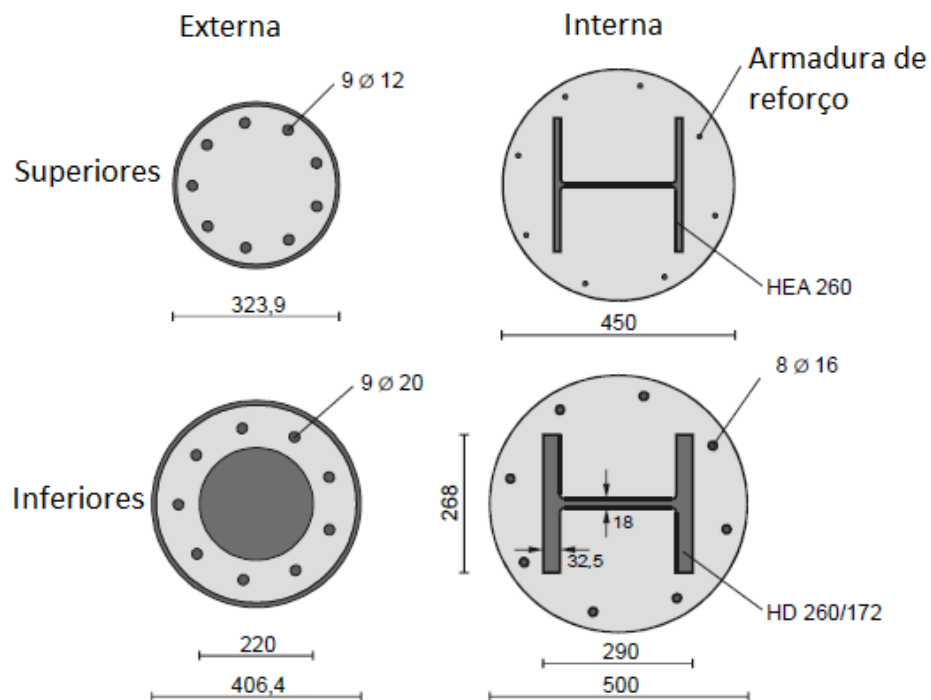


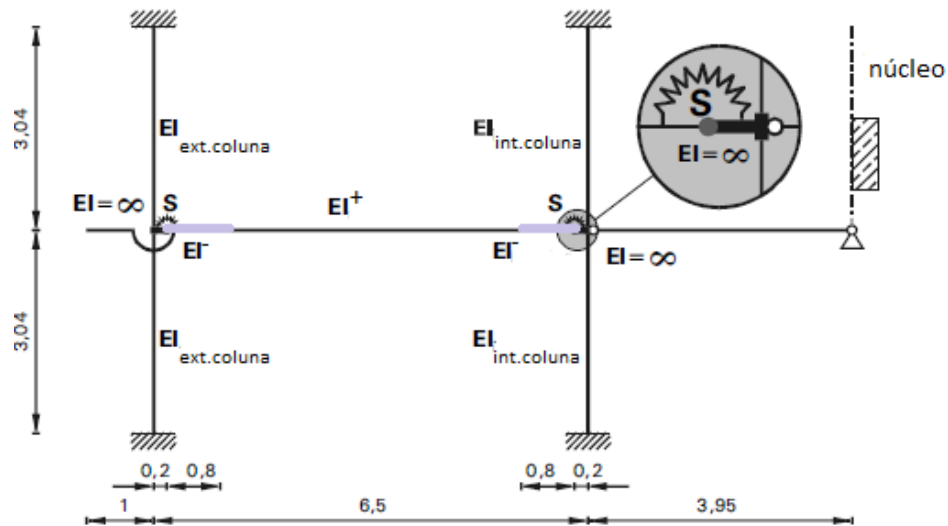
Figura 2.21: Secção transversal das colunas mistas [16].

Gerald Huber [16] refere que activar a acção de pórtico existente na ligação entre as vigas e as colunas permite a execução de pavimentos *slim floor* com menor altura, continuando a verificarem-se os limites impostos pelos ELU e ELS. Para a realização de uma análise global da estrutura, utilizou-se o modelo representado na Figura 2.22(a) com a caracterização de todos os elementos presentes como a rigidez das vigas, colunas e ligações [16]. Para efeitos comparativos efectuou-se o cálculo das deformações e momentos flectores para uma ligação com rigidez nula, ligação infinitamente rígida e para uma ligação semi rígida ($S = 5 \text{ MN.m}$) (Figura 2.22(b)). Considerando o carregamento existente, verificou-se que a ligação semi-rígida proporciona valores intermédios de momento flector e deformação, conduzindo a uma boa optimização na relação dimensionamento-custos [16].

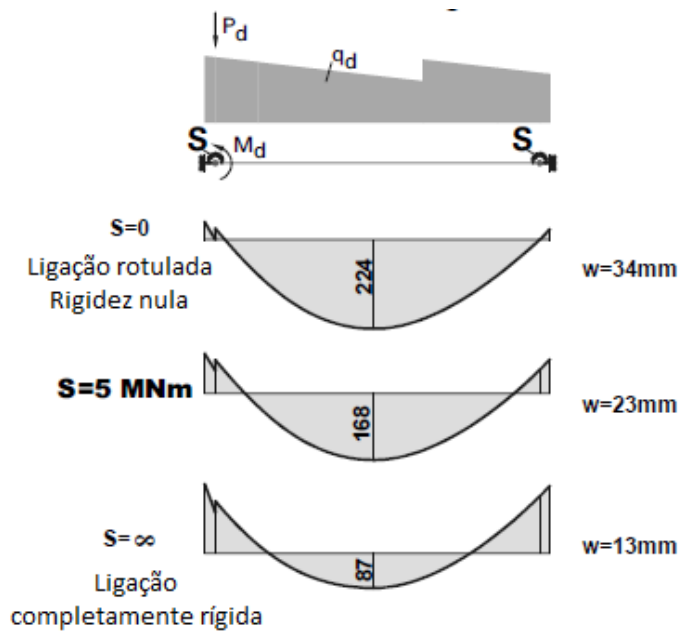
2.3.2 Parque de estacionamento DEZ (Innsbruck, Austria)

Outro exemplo importante do uso de pavimentos *slim floor* é o parque de estacionamento em *Innsbruck*, Áustria. É constituído por 4 andares e com uma área de implantação de 60x30 m [1].

À semelhança do caso anterior, a viga utilizada é um perfil em *T* invertido soldado (alma com 165 mm de altura e 20 mm de espessura, banzo com 245 mm de



(a) Modelo do pórtico, consideração do comportamento das ligações [16]



(b) Diagramas de esforços e valores de deformação [16]

Figura 2.22: Modelo de análise global, *Millennium Tower*, Viena.

largura com 40 mm de espessura), diferenciando-se no facto de neste caso existir uma laje pré-fabricada de 60 mm de espessura, efectuando-se posteriormente uma betonagem *in situ* com uma espessura de 200 mm, perfazendo uma altura total de laje de 260 mm (Figura 2.23). A ligação ao corte é efectuada com conectores de 22 mm de diâmetro. A ligação entre as vigas e as colunas mistas é semi-contínua, sendo possível a realização de vigas mistas com um vão máximo de 10,5 m para a espessura de pavimento referida [1].

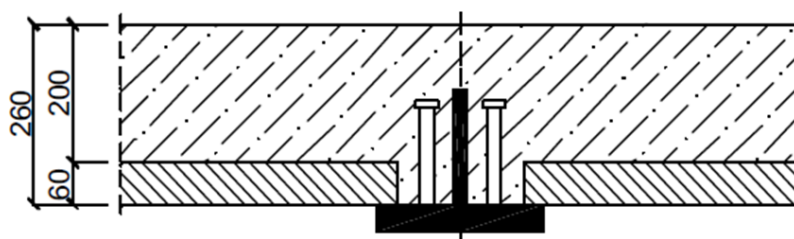


Figura 2.23: Secção transversal do pavimento misto *slim floor*, parque de estacionamento *DEZ*, *Innsbruck*-Austria [1].

2.3.3 *ING Bank* (Amesterdão, Holanda, 2002)

Este edifício utiliza o sistema *slimdek*, referido neste trabalho na Secção 2.3.2. O edifício apresenta entre 4 a 9 andares, área útil de 20 000 m^2 e está suportado por colunas mistas inclinadas, com 10 m de altura. O tempo de execução da estrutura metálica foi de 28 semanas [2]. Como se pode observar na Figura 2.24, o edifício apresenta uma zona denominada de *nose* (nariz, consola com 26 m) adjacente ao sistema *slimdek*, suportada por elementos inclinados [2].

Por opção arquitectónica, a fachada é constituída por envidraçados duplos. Desta forma, torna-se muito importante a escolha de um sistema de pavimentos com altura reduzida, uma vez que o pavimento permanece à vista. O sistema é constituído por vigas ASB, formando pórticos com uma dimensão de 7x7 m, aproximadamente, e lajes mistas suportadas pelos banzos inferiores das vigas, conseguindo-se uma altura total do pavimento de 300 mm [2].

As treliças de longo vão existentes foram dimensionadas para resistir a forças elevadas transmitidas pelas colunas inclinadas e para fornecer a estabilidade adequada a todo o edifício. As colunas são compostas por secções I em forma de cruz e preenchidas com betão [2].

Na laje, com vão de 7.2 m, foram usadas linhas duplas de escoramentos temporários para controlar a deformação [2]. As instalações dos serviços estão posicionadas por baixo da laje mista, entre as nervuras da chapa [2].

Na Holanda todos os projectos devem ter em conta o nível freático elevado. Desta forma, optou-se por minimizar os trabalhos nas fundações, transferindo as cargas através de colunas na envolvente do edifício [2].

Em suma, a escolha do sistema *slimdek* permitiu obter um pavimento com uma espessura reduzida, rapidez de execução e menor peso estrutural. O facto de se diminuir o peso estrutural tem como consequência a diminuição das cargas transmitidas às fundações, reduzindo os custos das mesmas [2].

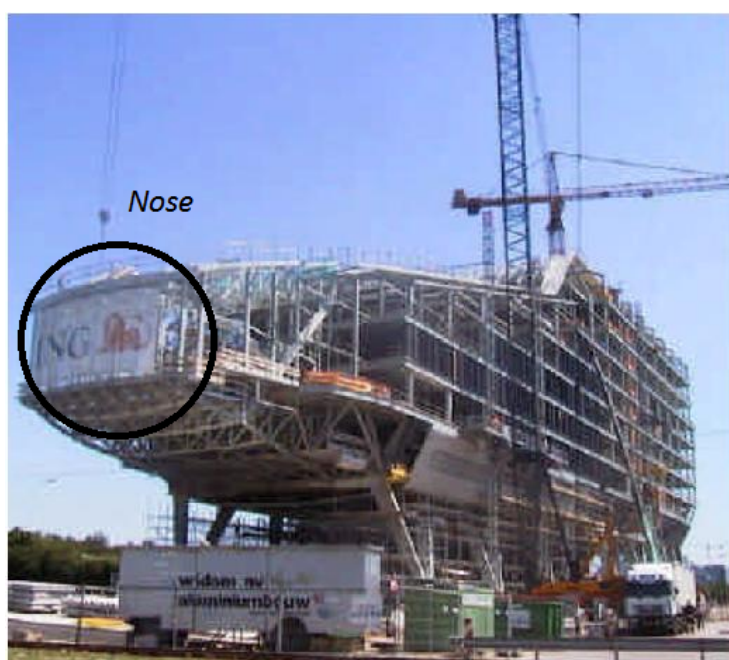


Figura 2.24: ING Bank (Amesterdão-Holanda) [2].

2.3.4 Edifício residencial (Baía de Cardiff, País de Gales, 2002)

Este edifício tem a peculiaridade de estar situado numa baía, significando que o nível freático é elevado, levando ao uso de estacas na realização das fundações. Como tal, surge a preocupação de diminuir o peso da estrutura de forma a que as cargas transmitidas às fundações sejam as menores possíveis. O sistema *slimdek* é 40% mais leve que um pavimento de betão armado equivalente, resultando na diminuição da quantidade de estacas a realizar. O facto de se estar perante uma zona que tem de ser protegida ambientalmente, também levou à escolha deste

sistema, uma vez que a entrega dos materiais é inferior, reduzindo o trânsito na envolvente [2].

Este projecto consiste na realização de 71 apartamentos, em 3 blocos, com 6 andares. O pavimento tem uma espessura de 300 mm e as vigas utilizadas são do tipo 280 ASB 100, com vãos entre os 6 e 7 m, havendo a possibilidade de se criar espaços desimpedidos. A construção da estrutura metálica, colocação da chapa nervurada e betonagem do pavimento durou apenas 12 semanas, menos 10 semanas que uma estrutura equivalente de betão [2].

Foram utilizados escoramentos temporários no suporte da chapa nervurada, que foram retirados ao final de 5 dias [2]. Na Figura 2.25, pode-se observar uma planta do edifício.

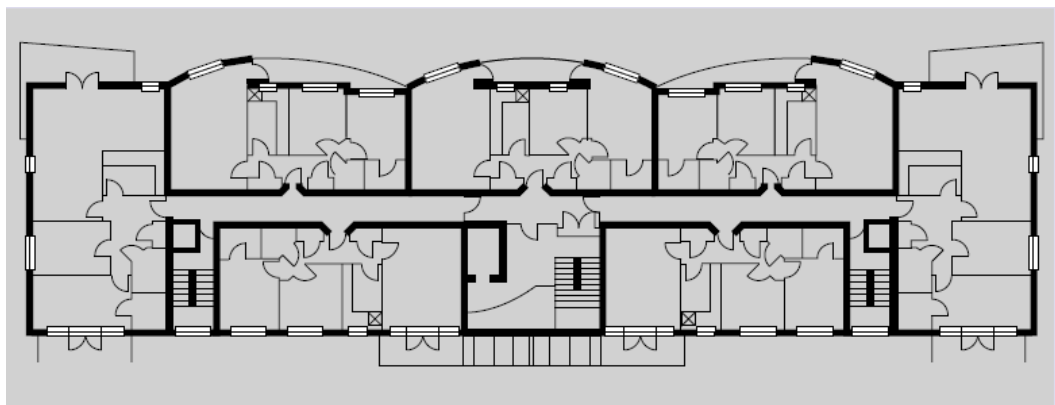


Figura 2.25: Planta, edifício residencial em Cardiff, País de Gales [2].

Capítulo 3

Dimensionamento de pavimentos *slim floor*

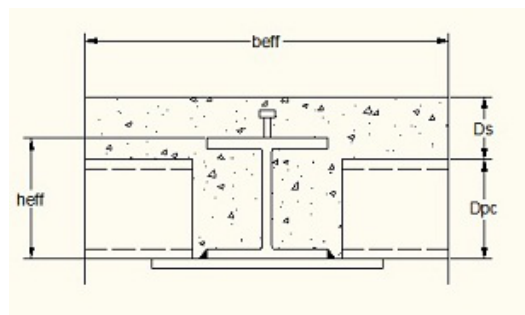
O EC4 [12], não é explícito quanto ao dimensionamento de vigas mistas *slim floor*. Esta norma permite contudo o dimensionamento de vigas mistas parcialmente betonadas (secção 6.3 do EC4), em que a ligação ao corte é efectuada necessariamente através de conectores, de forma a transferir a força longitudinal de corte entre o betão e o aço, tanto na ligação entre o banzo superior da secção metálica e o banzo efectivo de betão, como entre a alma e o betão de revestimento.

No entanto, a formulação do sistema *slim floor* dispensa a utilização de conectores na ligação entre a alma e o betão de revestimento, sendo que, no caso do pavimento tipo II-b (Figura 3.1(d)), é possível dispensar totalmente a utilização de conectores, efectuando-se a ligação por aderência [23, 24]. Desta forma, serão utilizadas as publicações do Steel Construction Institute [23, 24, 25].

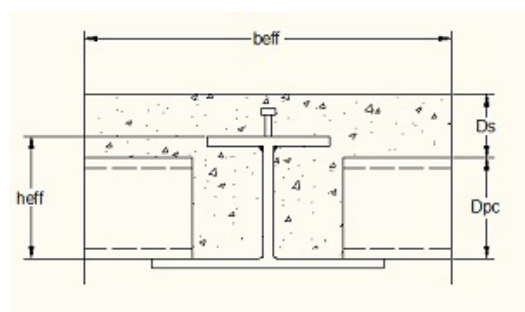
Neste trabalho serão considerados quatro tipos de pavimentos *slim floor*:

- Pavimento tipo I-a - viga SFB com laje maciça (Figura 3.1(a));
- Pavimento tipo I-b - viga IFB com laje maciça (Figura 3.1(c)).
- Pavimento tipo II-a - viga SFB com laje mista (Figura 3.1(b));
- Pavimento tipo II-b - viga IFB com laje mista (Figura 3.1(d)).

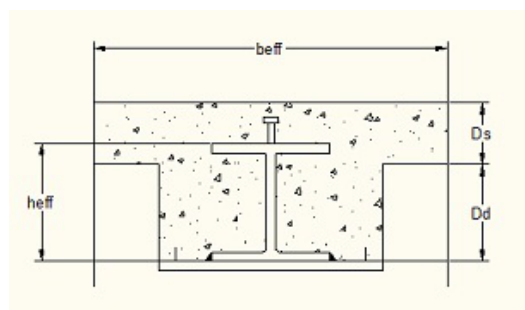
Em vigas mistas, a ligação ao corte entre a viga metálica e o betão é necessária para garantir a transferência dos esforços de corte longitudinal entre o betão e a secção metálica, de forma a conferir a acção mista. Esta é essencialmente realizada através de conexão mecânica discreta (conectores metálicos), na interface entre o banzo superior metálico e o banzo efectivo de betão e colocando armadura transversal na laje. No entanto, no caso do pavimento tipo II-b, tem-se a opção de estabelecer a ligação de forma contínua, por aderência, devido a nervuras existentes no banzo superior da viga IFB e colocando armadura transversal [23, 24].



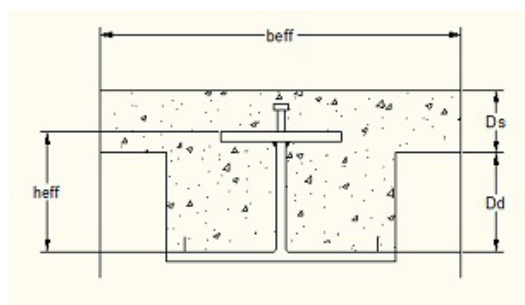
(a) pavimento tipo I-a



(b) Pavimento de tipo II-a



(c) pavimento tipo I-b



(d) Pavimento de tipo II-b

Figura 3.1: Pavimentos *slim floor* estudados no presente trabalho.

Apesar de no pavimento tipo I-b também ser utilizada a secção metálica IFB, não será considerada a possibilidade de execução da ligação ao corte sem conectores metálicos, devido a não existir informação técnica que corrobore esta possibilidade.

3.1 Fase de Construção - estados limites últimos

O dimensionamento de uma viga *slim floor* na fase de construção pode ser realizado de acordo com a norma EN 1993-1-1 (EC3 [13]), pois ainda não existe acção mista entre os materiais [13]. Como na generalidade dos elementos metálicos, nas secções *slim floor* deve ser verificada a resistência à flexão, ao esforço transversal, à combinação momento flector-esforço transversal e à encurvadura lateral por flexão torção, utilizando para tal as expressões da norma. Na presente secção serão abordados os aspectos particulares de verificação da segurança, tanto pelo EC3 como pelas publicações [23, 24, 25] baseadas na norma BS 5950: Parte 1.

Durante a fase de construção, de modo a reduzir o carregamento transmitido à viga, é por vezes necessário colocar escoramentos temporários, apesar de, em termos práticos, ser preferível a dispensa desses escoramentos [24]. Neste trabalho será considerado que na fase de construção os elementos encontram-se sem escoramento.

3.1.1 Classificação de secções metálicas

As capacidades da secção transversal podem ser afectadas devido à encurvadura local da alma ou do banzo à compressão. Desta forma, este efeito deve ser contabilizado no dimensionamento aplicando limitações quanto ao rácio das dimensões dos elementos apresentados na Tabela 3.1 segundo a BS 5950: Parte 1 e na Tabela 3.2 segundo a NP EN 1993-1-1 [10, 13].

Classe	Tipo de viga	banzo $B/t \leq$	alma $d/t_w \leq$
Classe 1	SFB e IFB A	9 ϵ	$\frac{80\epsilon}{1+r_1}$ mas $\geq 40\epsilon$
	IFB B	8 ϵ	
Classe 2	SFB	10 ϵ	$\frac{100\epsilon}{1+r_1}$ para $r_1 \geq 0$ e $\frac{100\epsilon}{1+1.5r_1}$ para $r_1 \leq 0$
	IFB	9 ϵ	

Tabela 3.1: Limites para a classificação da secção segundo a BS 5950: Parte 1 [10]

O rácio das tensões na alma r_1 , para secções com banzos diferentes, é dado por

$$r_1 = \frac{F_c}{d \cdot t_w \cdot p_{yw}} \frac{(b_t t_t - b_c t_c) \cdot p_{yf}}{d \cdot t \cdot p_{yw}} \text{ mas } -1 < r_1 \leq 1. \quad (3.1)$$

onde F_c é a força de compressão axial (negativa para a tracção), b_t é a largura do banzo à tracção, b_c é a largura do banzo à compressão, t_t é a espessura do banzo à tracção e t_c a espessura do banzo à compressão. O valor de cálculo da tensão de cedência dos banzos é definido por p_{yf} , enquanto que o valor de cálculo da tensão de cedência da alma é definida por p_{yw} .

O coeficiente ϵ é dado por $\sqrt{\frac{275}{p_y}}$.

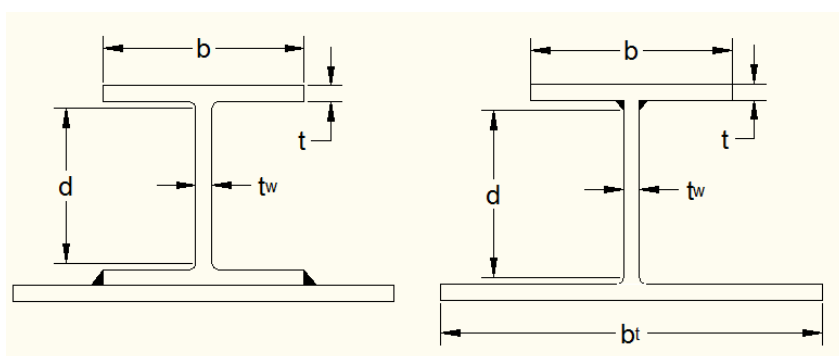


Figura 3.2: Definição das dimensões para a classificação das secções.

Na Tabela 3.1, segundo a norma BS 5950: Parte 1, para a classificação do banzo à compressão (banzo superior da secção, viga simplesmente apoiada), considerou-se que a secção do tipo SFB ou IFB tipo A é laminada e para uma secção IFB tipo B é soldada, tendo em conta que os banzos em causa apresentam essas características. A classificação da alma é realizada de acordo com o caso geral, tendo em conta que a alma se encontra tanto à compressão como à tracção [10]. Neste caso, a largura B é dada por $b/2$. A espessura do banzo é definida por t e a espessura da alma por t_w , o comprimento da alma é definido por d (Figura 3.2).

Classe	Tipo de viga	banzo $B/t \leq$	alma $d/t_w \leq$
Classe 1	SFB e IFB A IFB B	9 ϵ	$\frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ para $\alpha > 0.5$
			$\frac{36\epsilon}{\alpha}$ para $\alpha \leq 0.5$
Classe 2	SFB IFB	10 ϵ	$\frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ para $\alpha > 0.5$
			$\frac{41.5\epsilon}{\alpha}$ para $\alpha \leq 0.5$

Tabela 3.2: Limites para a classificação da secção segundo NP EN 1993-1-1 [13]

O coeficiente ϵ é dado por $\sqrt{\frac{275}{f_y}}$.

No caso da Tabela 3.2, segundo a norma NP EN 1993-1-1, a largura B é dada por metade da largura b menos o raio da secção laminada (r) ou a largura da soldadura (a). O valor do coeficiente α é dado pela relação entre a altura da alma

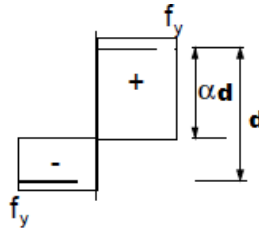


Figura 3.3: Definição do coeficiente α através da distribuição de tensões plásticas da secção [13].

à compressão e altura à tracção, através da distribuição de tensões plásticas. Na Figura 3.3 é apresentada a obtenção do coeficiente α , onde f_y é a tensão de cedência do aço [13].

Os limites apresentados são para a classificação de secções de Classe 1 e 2, pois pretende-se limitar a utilização apenas a esse tipo de secções, de forma que o dimensionamento seja simplificado face a secções de Classe 3 e 4.

3.1.2 Encurvadura lateral por flexão-torção

BS 5950: Parte 1

De acordo com [23, 24, 25], a verificação à encurvadura lateral por flexão-torção pode ser realizada pela norma BS 5950: Parte 1, considerando algumas simplificações referentes ao uso de vigas tipo IFB e SFB. O momento resistente de encurvadura (M_b) é dado por [10]

$$M_b = S_x p_b, \quad (3.2)$$

onde S_x é o módulo de flexão plástico da secção e p_b é a tensão de resistência à flexão, definida de acordo com o disposto na Tabela 16 (secções laminadas, soldadura à tracção SFB e IFB tipo A) ou Tabela 17 (soldadura à compressão, IFB tipo B) da norma BS 5950: Parte 1 (Figuras 3.5 e 3.6), em função do valor de cálculo da tensão resistente do aço (p_y) e da esbelteza equivalente para encurvadura lateral por flexão-torção (λ_{LT}), definida por [10]

$$\lambda_{LT} = nuv\lambda, \quad (3.3)$$

onde (n) é o factor de correcção da esbelteza, que é unitário para todo o tipo de vigas assimétricas, u é o parâmetro de encurvadura que pode assumir o valor de 0.82 para vigas do tipo ASB, e λ é a esbelteza da secção [23, 24]. Para uma viga do tipo ASB λ_{LT} é aproximadamente $0.75\nu\lambda$ [24]. Para vigas SFB deve-se proceder à determinação de u através da seguinte expressão [23, 10]

$$u = \left(\frac{4S_x^2 \gamma}{A_a^2 h_s^2} \right)^{0.25}, \quad (3.4)$$

onde A_a é a área total de aço da secção metálica, h_s é igual a à altura efectiva da secção metálica (h_{eff}) menos a espessura do banzo metálico (t_f), e γ é definido por

$$\gamma = 1 - \frac{I_y}{I_x}. \quad (3.5)$$

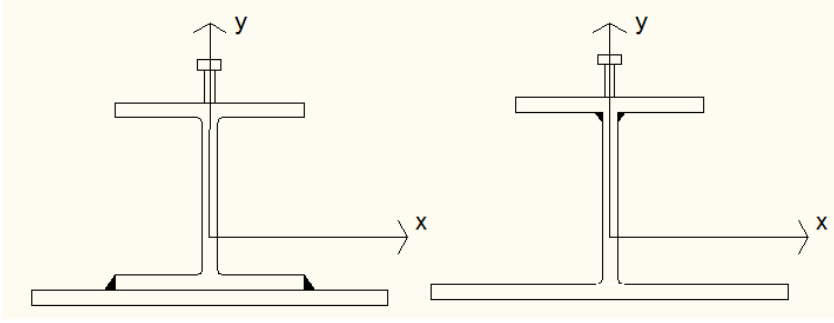


Figura 3.4: Representação dos eixos de inércia nas secções IFB e SFB para a norma BS 5950 [10].

Note-se que, para uma viga SFB, há a possibilidade de I_y ser o eixo de maior inércia, mas próximo do valor de I_x , devido ao banzo adicional soldado (Figura 3.4). Desta forma, o valor de γ e da esbelteza equivalente (λ_{LT}) tendem para zero, significando que a viga não se encontra sujeita à encurvadura por flexão-torção [23].

O factor de esbelteza (ν) pode ser obtido através da seguinte expressão [10]

$$\nu = \frac{1}{\left(\left(4\eta(1-\eta) + 0.05 \left(\frac{\lambda}{x} \right)^2 \right)^{0.5} + \Psi \right)^{-0.5}}, \quad (3.6)$$

onde η é o coeficiente de encurvadura lateral do banzo, definido por [23, 10]

$$\eta = \frac{I_{cy}}{I_{cy} + I_{ty}}, \quad (3.7)$$

I_{cy} e I_{ty} , são as inércias do banzo à compressão e do banzo à tracção, segundo o eixo y-y, respectivamente.

x é o índice de torção, dado por [23, 10]

$$x = 0.566h_s \left(\frac{A_a}{J} \right)^{0.5}, \quad (3.8)$$

e Ψ é o índice de monossimetria, obtido por

λ_{LT}	Classe de aço e tensão de cedência característica p_y (N/mm ²)														
	S 275					S 355					S 460				
	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	400	410	430	440	460
25	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	400	410	430	440	460
30	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	395	403	421	429	446
35	235	245	255	265	273	307	316	324	332	341	378	386	402	410	426
40	229	238	246	254	262	294	302	309	317	325	359	367	382	389	404
45	219	227	235	242	250	280	287	294	302	309	340	347	361	367	381
50	210	217	224	231	238	265	272	279	285	292	320	326	338	344	356
55	199	206	213	219	226	251	257	263	268	274	299	305	315	320	330
60	189	195	201	207	213	236	241	246	251	257	278	283	292	296	304
65	179	185	190	196	201	221	225	230	234	239	257	261	269	272	279
70	169	174	179	184	188	206	210	214	218	222	237	241	247	250	256
75	159	164	168	172	176	192	195	199	202	205	219	221	226	229	234
80	150	154	158	161	165	178	181	184	187	190	201	203	208	210	214
85	140	144	147	151	154	165	168	170	173	175	185	187	190	192	195
90	132	135	138	141	144	153	156	158	160	162	170	172	175	176	179
95	124	126	129	131	134	143	144	146	148	150	157	158	161	162	164
100	116	118	121	123	125	132	134	136	137	139	145	146	148	149	151
105	109	111	113	115	117	123	125	126	128	129	134	135	137	138	140
110	102	104	106	107	109	115	116	117	119	120	124	125	127	128	129
115	96	97	99	101	102	107	108	109	110	111	115	116	118	118	120
120	90	91	93	94	96	100	101	102	103	104	107	108	109	110	111
125	85	86	87	89	90	94	95	96	96	97	100	101	102	103	104
130	80	81	82	83	84	88	89	90	90	91	94	94	95	96	97
135	75	76	77	78	79	83	83	84	85	85	88	88	89	90	90
140	71	72	73	74	75	78	78	79	80	80	82	83	84	84	85
145	67	68	69	70	71	73	74	74	75	75	77	78	79	79	80
150	64	64	65	66	67	69	70	70	71	71	73	73	74	74	75
155	60	61	62	62	63	65	66	66	67	67	69	69	70	70	71
160	57	58	59	59	60	62	62	63	63	63	65	65	66	66	67
165	54	55	56	56	57	59	59	59	60	60	61	62	62	62	63
170	52	52	53	53	54	56	56	56	57	57	58	58	59	59	60
175	49	50	50	51	51	53	53	53	54	54	55	55	56	56	56
180	47	47	48	48	49	50	51	51	51	51	52	53	53	53	54
185	45	45	46	46	46	48	48	48	49	49	50	50	50	51	51
190	43	43	44	44	44	46	46	46	46	47	48	48	48	48	48
195	41	41	42	42	42	43	44	44	44	44	45	45	46	46	46
200	39	39	40	40	40	42	42	42	42	42	43	43	44	44	44
210	36	36	37	37	37	38	38	38	39	39	39	40	40	40	40
220	33	33	34	34	34	35	35	35	35	36	36	36	37	37	37
230	31	31	31	31	31	32	32	33	33	33	33	33	34	34	34
240	28	29	29	29	29	30	30	30	30	30	31	31	31	31	31
250	26	27	27	27	27	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29

Figura 3.5: Tabela para obtenção do valor de p_b para secções laminadas [10].

λ_{LT}	Classe de aço e tensão de cedência característica p_y (kN/mm ²)														
	S 275					S 355					S 460				
	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	400	410	430	440	460
25	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	400	410	430	440	460
30	235	245	255	265	275	315	325	335	345	355	390	397	412	419	434
35	235	245	255	265	272	300	307	314	321	328	358	365	378	385	398
40	224	231	237	244	250	276	282	288	295	301	328	334	346	352	364
45	206	212	218	224	230	253	259	265	270	276	300	306	316	321	332
50	190	196	201	207	212	233	238	243	248	253	275	279	288	293	302
55	175	180	185	190	195	214	219	223	227	232	251	255	263	269	281
60	162	167	171	176	180	197	201	205	209	212	237	242	253	258	269
65	150	154	158	162	166	183	188	194	199	204	227	232	242	247	256
70	139	142	146	150	155	177	182	187	192	196	217	222	230	234	242
75	130	135	140	145	151	170	175	179	184	188	207	210	218	221	228
80	126	131	136	141	146	163	168	172	176	179	196	199	205	208	214
85	122	127	131	136	140	156	160	164	167	171	185	187	190	192	195
90	118	123	127	131	135	149	152	156	159	162	170	172	175	176	179
95	114	118	122	125	129	142	144	146	148	150	157	158	161	162	164
100	110	113	117	120	123	132	134	136	137	139	145	146	148	149	151
105	106	109	112	115	117	123	125	126	128	129	134	135	137	138	140
110	101	104	106	107	109	115	116	117	119	120	124	125	127	128	129
115	96	97	99	101	102	107	108	109	110	111	115	116	118	118	120
120	90	91	93	94	96	100	101	102	103	104	107	108	109	110	111
125	85	86	87	89	90	94	95	96	96	97	100	101	102	103	104
130	80	81	82	83	84	88	89	90	90	91	94	94	95	96	97
135	75	76	77	78	79	83	83	84	85	85	88	88	89	90	90
140	71	72	73	74	75	78	78	79	80	80	82	83	84	84	85
145	67	68	69	70	71	73	74	74	75	75	77	78	79	79	80
150	64	64	65	66	67	69	70	70	71	71	73	73	74	74	75
155	60	61	62	62	63	65	66	66	67	67	69	69	70	70	71
160	57	58	59	59	60	62	62	63	63	63	65	65	66	66	67
165	54	55	56	56	57	59	59	59	60	60	61	62	62	62	63
170	52	52	53	53	54	56	56	56	57	57	58	58	59	59	60
175	49	50	50	51	51	53	53	53	54	54	55	55	56	56	56
180	47	47	48	48	49	50	51	51	51	51	52	53	53	53	54
185	45	45	46	46	46	48	48	48	49	49	50	50	50	51	51
190	43	43	44	44	44	46	46	46	46	47	48	48	48	48	48
195	41	41	42	42	42	43	44	44	44	44	45	45	46	46	46
200	39	39	40	40	40	42	42	42	42	42	43	43	44	44	44
210	36	36	37	37	37	38	38	38	39	39	39	40	40	40	40
220	33	33	34	34	34	35	35	35	35	36	36	36	37	37	37
230	31	31	31	31	31	32	32	33	33	33	33	33	34	34	34
240	28	29	29	29	29	30	30	30	30	30	31	31	31	31	31
250	26	27	27	27	27	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29

Figura 3.6: Tabela para obtenção do valor de p_b para secções soldadas [10].

$$\Psi = 0.8(2\eta - 1) \quad \text{para} \quad \eta > 0.5 \quad (3.9)$$

$$\Psi = 1(2\eta - 1) \quad \text{para} \quad \eta < 0.5. \quad (3.10)$$

Posteriormente à definição de p_b e M_b , a viga é resistente à encurvadura lateral por flexão-torção se a seguinte condição for verificada [10]

$$M_{Ed} \leq \frac{M_b}{m_{LT}}, \quad (3.11)$$

Onde M_{Ed} é o valor do momento máximo actuante e m_{LT} é o factor de momento uniforme equivalente, que pode assumir um valor unitário se a carga for instabilizante. No entanto, o seu valor pode ser obtido através da distribuição de momento flector, consultando a Tabela 18 da norma BS 5950: Parte 1 (Figura 3.7) [10].

NP EN 1993-1-1

Segundo a norma NP EN 1993-1-1, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura por flexão-torção $M_{b,Rd}$, é definido da seguinte forma [13]

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (3.12)$$

onde $W_{pl,y}$ é o módulo de flexão plástico da secção em torno do eixo de maior inércia (nesta norma o eixo y é perpendicular à altura da secção), f_y é a tensão de cedência do aço e χ_{LT} é o coeficiente de redução para a encurvadura lateral, definido por

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1, \quad (3.13)$$

com

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right), \quad (3.14)$$

sendo α_{LT} o factor de imperfeição para a encurvadura lateral, obtido na consulta das Tabelas 6.3 e 6.4 do EC3. A esbelteza adimensional para a encurvadura por flexão-torção $\bar{\lambda}_{LT}$ é definida por [13]

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}, \quad (3.15)$$

onde M_{cr} é o momento crítico elástico de encurvadura por flexão-torção.

A viga é resistente à encurvadura lateral por flexão-torção se a seguinte condição for verificada

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}. \quad (3.16)$$

Vigas com momento nas extremidades		β	m_{LT}
β positivo		1.0	1.00
		0.9	0.96
		0.8	0.92
		0.7	0.88
		0.6	0.84
		0.5	0.80
		0.4	0.76
		0.3	0.72
		0.2	0.68
		0.1	0.64
		0.0	0.60
β negativo		-0.1	0.56
		-0.2	0.52
		-0.3	0.48
		-0.4	0.46
		-0.5	0.44
		-0.6	0.44
		-0.7	0.44
		-0.8	0.44
		-0.9	0.44
		-1.0	0.44

Casos específicos	
$m_{LT} = 0.850$	$m_{LT} = 0.925$

$m_{LT} = 0.925$	$m_{LT} = 0.744$

Figura 3.7: Tabela para obtenção do valor de m_{LT} [10].

3.1.3 Combinação flexão-torção

Como já se referiu no Capítulo 2, neste tipo de sistemas a laje descarrega sobre o banzo inferior da viga metálica, o que pode originar efeitos de torção, uma vez que as cargas são transmitidas à viga fora do centro de corte. Na fase de construção é impossível assegurar que a colocação das unidades pré-fabricadas (pavimento tipo I) ou a betonagem *in situ* (pavimento tipo II) sejam efectuadas de forma a não introduzir torção, pelo que este efeito tem de ser contabilizado na verificação da segurança [23].

À medida que a colocação das unidades pré-fabricadas (pavimento tipo I) ou a betonagem *in situ* (pavimento tipo II) vai sendo efectuada, verifica-se frequentemente o aumento dos efeitos de torção, uma vez que as cargas provenientes da aplicação da laje podem descarregar apenas de um dos lados da viga. Se a extensão da colocação (z) aumenta ao longo do vão L , consequentemente aumenta a probabilidade da ocorrência de torção ou encurvadura por flexão-torção, uma vez que a carga não equilibrada aumenta.

É possível proceder à verificação da resistência da secção à flexão-torção considerando que um dos compartimentos adjacentes à viga tem a laje totalmente aplicada e o outro não, considerando-se assim o maior desequilíbrio de cargas possível. (Figura 3.8 e 3.9) [25]. Este é o método indicado no caso da aplicação de lajes mistas ou laje maciça betonada *in situ*, uma vez que são executadas na totalidade do compartimento. No caso da aplicação de unidades pré-fabricadas, para além deste método, é possível definir o valor limite da extensão (z) a partir do qual se verifica a necessidade de iniciar a colocação das unidades nos compartimentos adjacentes de modo a garantir que o desequilíbrio não excede um determinado valor [23].

No caso do pavimento tipo I-a, Figura 3.8, a carga W_1 contabiliza o peso próprio das unidades pré-fabricadas (em função de z) e a sobrecarga para a fase de construção. A carga W_2 representa o peso próprio da viga. No pavimento tipo II-a, Figura 3.9, é considerado que de um dos lados da viga é-lhe transmitida a carga W_1 , correspondente ao peso próprio da chapa nervurada, das armaduras, do betão colocado *in situ* e da sobrecarga para a fase de construção. Do outro lado da viga considera-se que o pavimento ainda não se encontra betonado, sendo transmitida à viga a carga W_3 , que corresponde ao peso próprio da chapa nervurada e das armaduras colocadas [23, 25].

De acordo com [23, 24, 25], os efeitos da torção devem ser considerados tendo em conta a parcela não-uniforme (empenamento). As tensões no banzo superior devido ao empenamento são combinadas com as tensões devidas à flexão global da secção. A forma simplificada de se proceder a essa combinação consiste na

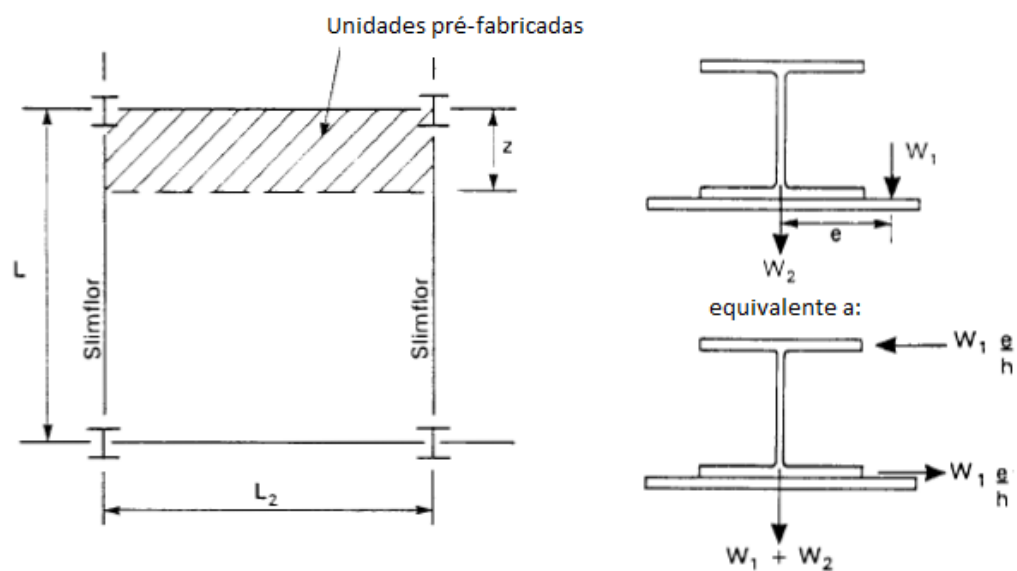


Figura 3.8: Cargas actuantes - colocação de unidades pré-fabricadas (pavimento tipo I-a) [23].

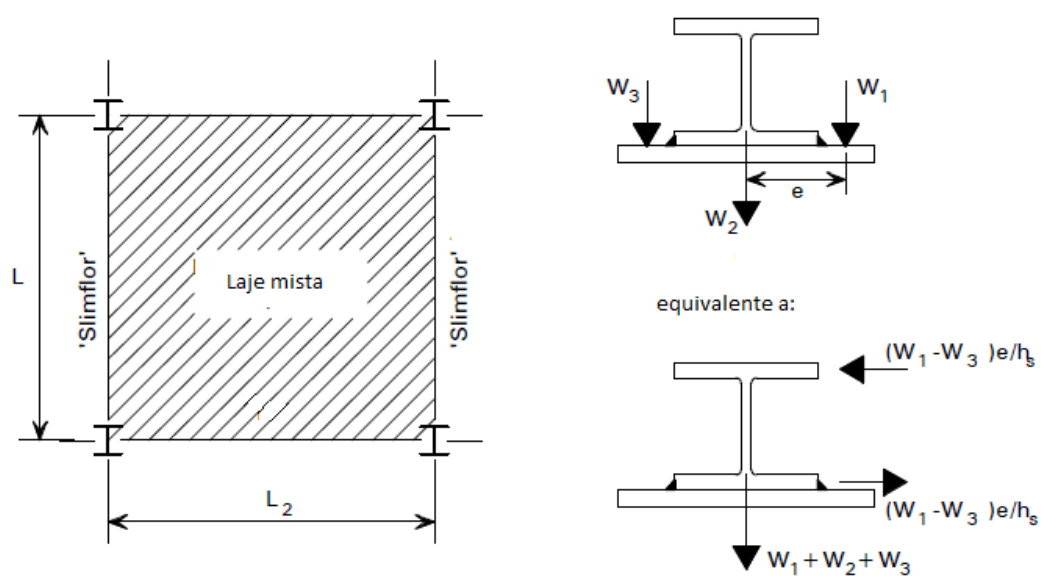


Figura 3.9: Cargas actuantes - betonagem na totalidade do compartimento (pavimento tipo II-a) [25].

verificação da condição

$$\frac{M_x}{M_b} + \frac{M_y}{M_{cy}} \leq 1. \quad (3.17)$$

Onde M_x é o momento actuante segundo a direcção x-x, M_y é o momento transversal actuante no banzo superior metálico segundo a direcção y-y e M_{cy} é o momento resistente do banzo superior segundo a direcção y-y.

No caso do pavimento tipo I-a, o momento actuante na secção M_x , é definido pelas cargas W_1 e W_2 e em função da extensão de aplicação das unidades pré-fabricadas (z). O momento transversal actuante no banzo superior (M_y), é definido pela carga aplicada no banzo superior metálico ($W_1 \frac{e}{h}$) (Figura 3.8). Desta forma, obrigando a condição 3.17 a ser verificada, é possível determinar o valor de z para que as cargas provocadas pela aplicação das unidades pré-fabricadas não introduzam efeitos de torção que comprometam a resistência da viga.

No caso do pavimento tipo II-a, os momentos actuantes já não são determinados em função de z . Como já se referiu, considera-se a betonagem total de um dos compartimentos adjacentes à viga. Assim, basta verificar a condição 3.17, para verificar a resistência da viga à combinação flexão-torção.

Para os pavimentos tipo I-b e II-b, o processo é semelhante ao apresentado.

Análises mais precisas mostram que a resistência da viga a este fenómeno de instabilidade é maior do que a obtida pelo método apresentado, principalmente se for contabilizada a rigidez de torção da secção. O processo apresentado é assim conservativo, pois despreza a rigidez de torção e a ligação viga-pilar confere restrições à torção e ao empenamento que provocam uma redução de M_y . Para aproximar os resultados da análise simplificada da análise mais precisa pode-se considerar que o momento efectivo devido ao empenamento toma o valor de $0.5M_y$ [24].

3.1.4 Efeito das tensões biaxiais no banzo inferior

No banzo inferior da viga SFB surgem tensões biaxiais provocadas pela forma como as cargas são aplicadas, as quais têm de ser contabilizadas na verificação da resistência da mesma. A chapa pode estar sujeita a tensões longitudinais, provocadas pela flexão global da secção (σ_1) (Figura 3.10) e simultaneamente a tensões σ_2 provocadas pela flexão transversal da própria chapa, devido às cargas directamente nela aplicadas, provocando a diminuição da sua resistência [23].

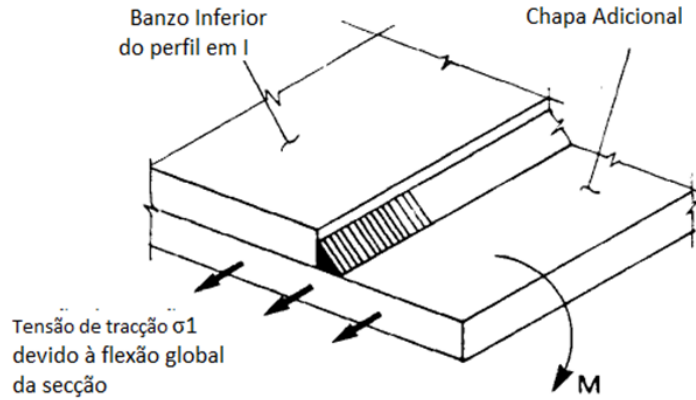


Figura 3.10: Pormenor do banzo inferior da viga SFB [23].

Para ser verificada a resistência da chapa, segundo o critério de Von Mises, tem-se

$$\sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1^2} = p_y, \quad (3.18)$$

o que conduz a

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 \pm \sqrt{(4p_y^2 - 3\sigma_1^2)}}{2}. \quad (3.19)$$

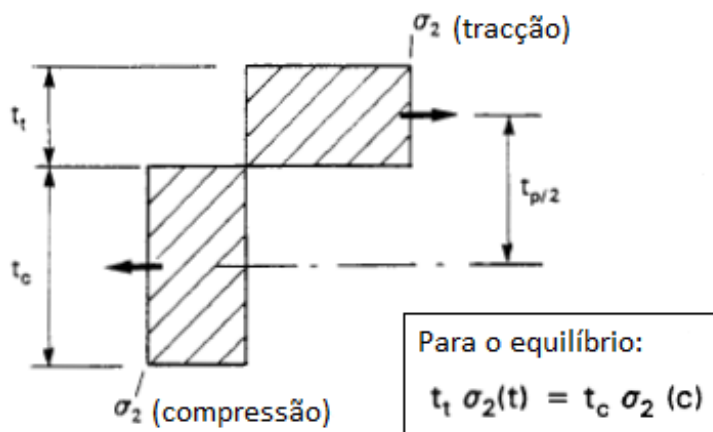


Figura 3.11: Distribuição de tensões plásticas no banzo inferior [23].

Note-se que o valor de σ_2 depende do sinal de σ_1 . Assim, para σ_1 e σ_2 positivos tem-se

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sqrt{(4p_y^2 - 3\sigma_1^2)}}{2}, \quad (3.20)$$

para σ_1 positivo e σ_2 negativo tem-se

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 - \sqrt{(4p_y^2 - 3\sigma_1^2)}}{2}. \quad (3.21)$$

Quer isto dizer que, para σ_1 positivo, σ_2 será maior à tracção do que à compressão.

Procedendo ao equilíbrio de forças no banzo inferior, através da distribuição de tensões plásticas para σ_1 positivo (Figura 3.11), e através da equação (3.19) é possível obter a relação

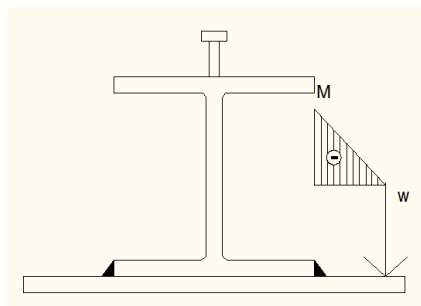
$$\frac{M}{M_p} = \frac{c^2 - \sigma_1^2}{2cp_y}, \quad (3.22)$$

em que $M_p = \frac{t_p^2 p_y}{4}$ é o momento plástico resistente do banzo inferior e

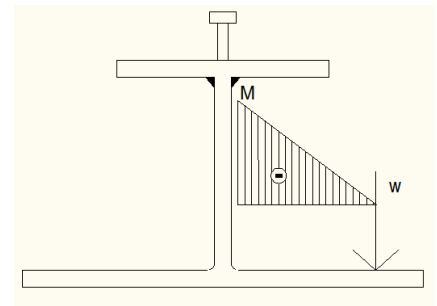
$$c = \sqrt{4p_y^2 - 3\sigma_1^2}. \quad (3.23)$$

Desta forma, para verificar a resistência da chapa, a relação entre o momento actuante máximo transversal (M) e o momento plástico resistente do banzo inferior M_p , tem de ser menor ou igual a $\frac{c^2 - \sigma_1^2}{2cp_y}$ [23].

A figura 3.12 ilustra como se procede ao cálculo do momento transversal no banzo inferior metálico, numa viga ASB e SFB.



(a) Diagrama de momento transversal M no banzo inferior metálico da viga SFB.



(b) Diagrama de momento transversal M no banzo inferior metálico da viga ASB.

Figura 3.12: momento transversal M no banzo inferior metálico de viga ASB e SFB.

O gráfico ilustrado na Figura 3.13 possibilita a visualização da influência das tensões longitudinais σ_1 nas tensões por flexão transversal σ_2 [23]. A interação entre a flexão local e a flexão longitudinal para vigas do tipo IFB pode ser determinada através da expressão aproximada [24]

$$\frac{\sigma_1}{p_y} \approx \sqrt{1 - 0.52 \frac{M}{M_p} - 0.48 \left(\frac{M}{M_p} \right)^2}. \quad (3.24)$$

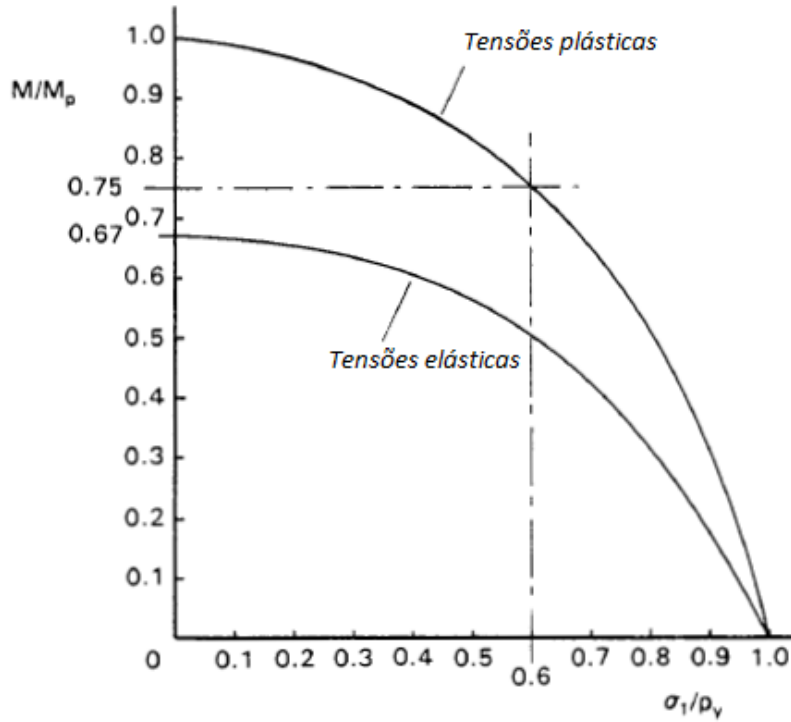


Figura 3.13: Influência da tensão longitudinal σ_1 na tensão de flexão transversal σ_2 [23].

Neste caso, a interação entre a tensão longitudinal σ_1 e a tensão por flexão transversal do banzo σ_2 pode ser ignorada se $M < 0.3M_p$. A tensão longitudinal substitui a tensão resistente do aço no banzo inferior metálico, e procede-se a uma análise plástica modificada, em que o módulo de flexão plástica é reduzido ($S_{x,red}$) tendo em conta a flexão transversal no banzo inferior, segundo a expressão [24]

$$S_{x,red} = S_x \left(0.7 + 0.3 \frac{\sigma_1}{p_y} \right). \quad (3.25)$$

3.2 Secção mista - estados limites últimos

3.2.1 Classificação de secções mistas

Segundo a norma BS 5950: Parte 3.1, a classificação da secção mista tendo em conta a encurvadura local, deve ser efectuada de acordo com a norma BS 5950: Parte 1 (Secção 3.1.1, Tabela 3.1.1), excepto nos seguintes casos

Tipo de Elemento	Classe da secção		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Alma com a linha neutra da secção a meia-altura	$\frac{d}{t} \leq 64\epsilon$	$\frac{d}{t} \leq 76\epsilon$	$\frac{d}{t} \leq 114\epsilon$
Alma, caso geral	$\frac{d}{t} \leq \frac{64\epsilon}{1+r}$	$\frac{d}{t} \leq \frac{76\epsilon}{1+r}$	para $r \geq 0.66$: secções laminadas: $\frac{d}{t} \leq \frac{114\epsilon}{1+2r}$ secções soldadas: $\frac{d}{t} \leq \left(\frac{41}{r} - 13\right)\epsilon$ para $0.66 > r \geq 0$: $\frac{d}{t} \leq \frac{114\epsilon}{1+2r}$ para $r < 0$: $\frac{d}{t} \leq \frac{114\epsilon(1+r)}{(1+2r)^{\frac{3}{2}}}$

Figura 3.14: Classificação da alma de acordo com a norma BS 5950: Parte 3.1 [11].

- A classificação da alma deve ser efectuada segundo a Tabela 2 da norma BS 5950: Parte 3.1 (Figura 3.14).
- Um banzo de aço à compressão, restringido pela conexão a um banzo de betão através de conectores metálicos (dimensionados de acordo com a Secção 5.4 BS 5950: Parte 3.1) deve ser considerado na Classe 1.
- Um banzo de aço à compressão, restringido pela conexão a uma laje mista através de conectores metálicos (dimensionados de acordo com a Secção 5.4 BS 5950: Parte 3.1), em que as nervuras da laje estejam pelo menos a 45° em relação ao eixo da viga ou a largura da nervura de betão (b_r) adjacente à viga não seja menor que a largura do banzo da viga, deve ser considerado numa classe inferior ao definido pela norma BS 5950: Parte 1.

Na tabela da Figura 3.14, indica-se o limite do valor do rácio da média das tensões longitudinais na alma (r), para o valor de cálculo da tensão de cedência p_y , considerando uma distribuição de tensões rectangular [11].

3.2.2 Verificação da resistência à flexão

Segundo o disposto em [23, 24, 25], a verificação da resistência à flexão da secção mista baseia-se em diagramas rectangulares de tensão, com uma tensão

resistente de $0.45f_{cu}$ para o betão e o valor de cálculo da tensão de cedência do aço p_y .

Para o cálculo do momento plástico resistente ($M_{pl,Rd}$) é necessário conhecer a posição da linha neutra plástica (y_p) a partir da face superior da laje. Proceda-se ao equilíbrio de forças de tracção e de compressão da secção definidas a partir dos diagramas de tensão rectangulares, obtendo-se como resultado o valor de y_p . Também é necessário definir o valor da largura efectiva do banzo de betão (b_{eff}), que para uma ligação ao corte com conectores é definido por $L/4$ e para uma ligação ao corte por aderência por $L/8$ [23, 24]. Desta forma, basta efectuar o cálculo do momento resistente. A condição de resistência à flexão é

$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}, \quad (3.26)$$

onde M_{Ed} é o momento actuante máximo da secção e $M_{pl,Rd}$ é o momento plástico resistente da secção mista.

As expressões para o cálculo da posição da linha neutra plástica e do momento plástico resistente podem ser consultadas no Anexo A, para os pavimentos tipo I-a, I-b, II-a e II-b. Estas expressões foram adaptadas das publicações do Steel Construction Institute [23, 24], de modo a utilizarem a simbologia utilizada pela ArcelorMittal para as dimensões da secção metálica. Na Secção 3.2.3, para efectuar este cálculo, é necessário assumir algumas simplificações conservativas. Para o pavimento tipo I-a e II-a, considera-se que a tensão resistente da laje pré-fabricada é igual à tensão resistente do betão colocado *in situ*, apesar de se ter demonstrado ser superior [23]. Para o pavimento tipo I-b e II-b considera-se que o betão entre as nervuras da laje mista é desprezado, isto é, o betão que permaneça abaixo da altura D_s não é considerado mesmo que se encontre à compressão [24].

Para pavimentos tipo II-b com conexão por aderência, o SCI refere que a altura de revestimento de betão acima da secção metálica deve ter um mínimo de 30 mm e um máximo de 60 mm, de modo a respeitar os limites geométricos utilizados nos ensaios realizados pelo SCI com este tipo de vigas mistas [24].

3.2.3 Conexão de corte

Conexão com conectores

Neste trabalho apenas será considerada a conexão total ao corte. No caso de utilização de conectores, uma conexão total é estabelecida quando o número de conectores é igual ou superior aos que seriam necessários para assegurar a mobilização do momento plástico resistente da secção mista [23].

Para o cálculo da força de ligação ao corte F_p , é necessário encontrar primeiro a posição da linha neutra plástica através das expressões definidas no Anexo A. Estas expressões foram adaptadas das publicações do SCI [23, 24] para os pavimentos em estudo.

Para uma secção de momento positivo, depois de conhecida a posição da linha neutra plástica (y_p) contabilizada a partir do topo da secção mista, calcula-se a força resistente do betão (R_c), do banzo metálico adicional (R_p) e da restante secção metálica (R_s). Em que,

$$R_c = 0.45f_{cu}b_{eff}y_p, \quad (3.27)$$

$$R_s = Ap_y, \quad (3.28)$$

$$R_p = A_p p_y. \quad (3.29)$$

Onde b_{eff} é a largura efectiva do banzo de betão, A é a área da secção metálica excepto a área do banzo adicional e A_p é a área do banzo adicional.

Estas forças resistentes são obtidas através de diagramas rectangulares de tensão, com uma tensão resistente de $0.45f_{cu}$ para o betão, em que f_{cu} é a tensão resistente característica do betão em provetes cúbicos, e uma tensão resistente para o aço p_y [23]. Na Figura 3.15, é exemplificada a distribuição de tensões na secção mista para o pavimento tipo I-b, para uma posição genérica da linha neutra plástica. Para o pavimento tipo I-a a distribuição de tensões é similar à apresentada. Desta forma, entre uma secção de momento positivo máximo e uma secção de momento nulo, a força a transmitir na conexão F_p , é dada por [23]

$$F_p = \min(R_c, R_s + R_p). \quad (3.30)$$

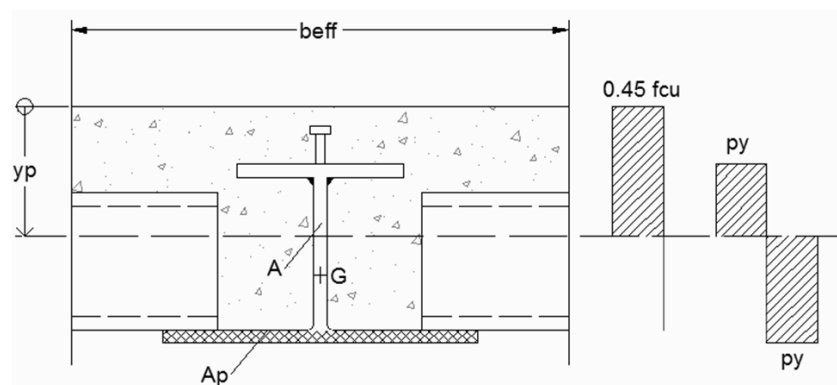


Figura 3.15: Distribuição rectangular de tensões, Pavimento tipo I-b.

Com a força de corte definida, o número de conectores necessários (N_p) é dado

por [23]

$$N_p = \frac{F_p}{Q_p}, \quad (3.31)$$

onde Q_p é a força resistente dos conectores de corte para a região de momentos positivos, a qual é dada por

$$Q_p = 0.8Q_k. \quad (3.32)$$

Em que Q_k é a força resistente característica dos conectores.

No caso da utilização de lajes mistas, o betão à compressão contido nas nervuras é desprezado para o cálculo da força de ligação ao corte (F_p), uma vez que também não é considerado para o cálculo do momento plástico resistente [24, 25, 11]. A distribuição de tensões rectangular para o pavimento tipo II-a, para uma posição genérica da linha neutra plástica, é indicada na Figura 3.16. Para o pavimento tipo II-b a distribuição é similar.

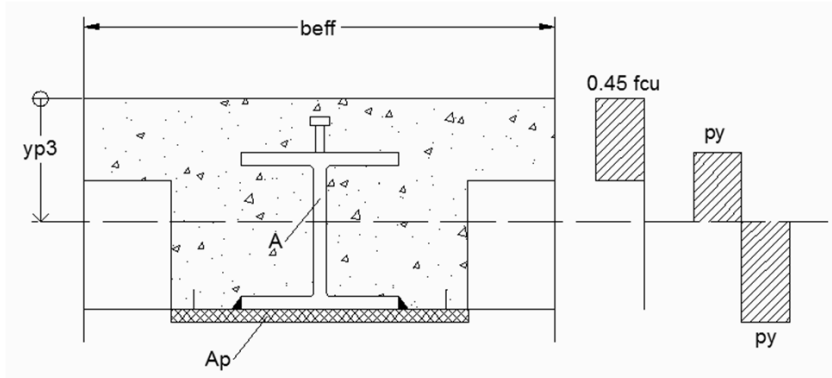


Figura 3.16: Distribuição rectangular de tensões, Pavimento tipo II-a.

Para calcular o número de conectores necessários entre uma secção de momento negativo máximo e uma secção de momento nulo (N_n), é necessário calcular a respectiva força de corte F_n [11], a qual é dada por,

$$F_n = 0.87f_y A_r, \quad (3.33)$$

onde f_y é a tensão de cedência característica da armadura de reforço e A_r é a área da armadura de reforço na secção efectiva de betão. O número de conectores é dado por

$$N_n = \frac{F_n}{Q_n}, \quad (3.34)$$

onde Q_n é a força resistente dos conectores de corte para a região de momentos negativos, a qual é dada por,

$$Q_n = 0.6Q_k. \quad (3.35)$$

Conexão por aderência

No caso da utilização de uma conexão contínua por aderência, a ligação total ao corte é estabelecida quando se assegura o desenvolvimento da resistência de compressão (R_c) da altura de betão acima da chapa nervurada (D_s) e dentro da largura efectiva (b_{eff}), definida por [24],

$$R_c = 0.45f_{cu}b_{eff}D_s. \quad (3.36)$$

Isto é, em casos em que a linha neutra plástica se situe abaixo da espessura de betão D_s , a conexão total é verificada se F_{sb} for igual ou superior à força de compressão resistente do betão (R_c), isto é, $F_{sb} \geq R_c$. No caso contrário, se a linha neutra plástica se situar no banzo superior da secção metálica ou na alma, dentro da espessura de betão, existe conexão total ao corte se $F_{sb} \geq (R_c y_p / D_s)$ [24].

Para verificar a conexão total ao corte é necessário determinar a força de corte longitudinal (F_{sb}). A sua transferência é realizada através de tensões que se desenvolvem ao longo do banzo superior da secção metálica e de ambos os lados da alma (Figura 3.17). Para vigas carregadas uniformemente, a máxima força de corte longitudinal que se pode verificar entre a secção de momento máximo e a secção de momento nulo é obtida considerando a área do diagrama de fluxo de corte elástico, entre estas duas secções (Figura 3.18) [24]. Deste modo, a força F_{sb} para vigas IFB tipo A é definida por [24]

$$F_{sb} = (2b - t_w + 2h_{eff}) L_{cr} \frac{f_{sb}}{2}, \quad (3.37)$$

e para vigas IFB tipo B, é definida por [24]

$$F_{sb} = (2b_p - t_w + 2h_{eff}) L_{cr} \frac{f_{sb}}{2}. \quad (3.38)$$

Onde b_p é a largura do banzo metálico adicional, b é a largura do banzo metálico da secção, t_w é a espessura da alma e h_{eff} é a altura efectiva da secção metálica, ou seja, é a altura total da secção metálica menos a espessura do banzo adicional metálico.

A resistência média da ligação ao corte (f_{sb}) em torno do banzo e da alma, para uma viga do tipo ASB, com nervuras realizadas no banzo superior, foi obtida através de ensaios realizados determinando-se um valor de 0.6 N/mm^2 [24]. Este valor é semelhante ao definido no EC4 para colunas tubulares preenchidas com betão [20].

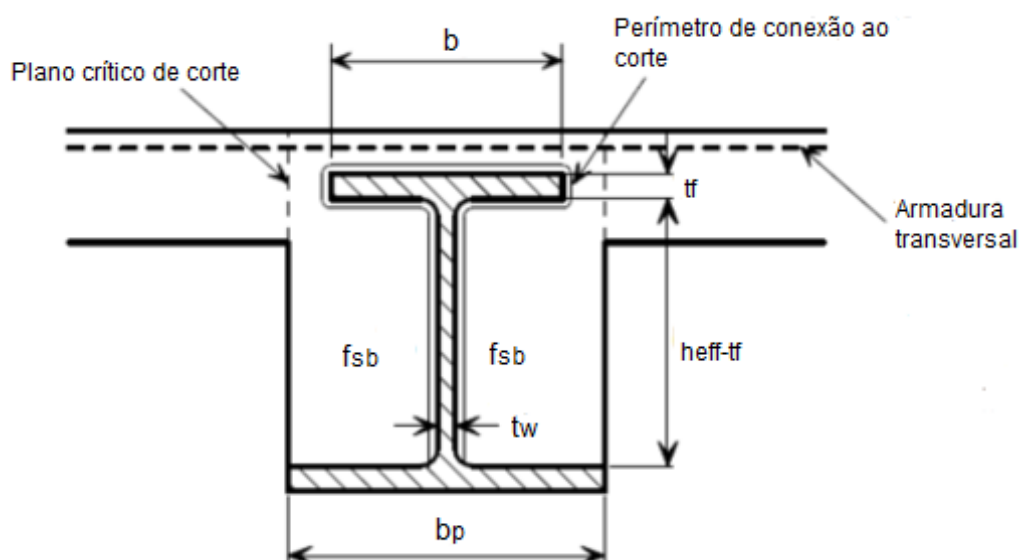


Figura 3.17: Transferência de corte ao longo da superfície interna da viga metálica, Viga IFB tipo A [24].

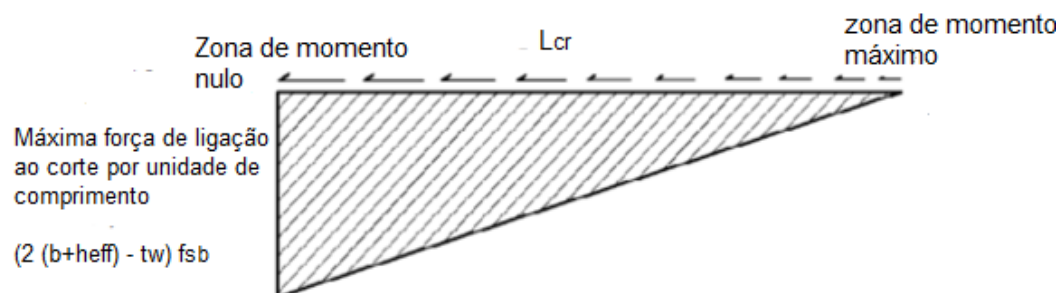


Figura 3.18: fluxo de corte ao longo da viga longitudinalmente, Viga IFB tipo A [24].

Em suma, para efectuar o cálculo da resistência, é necessário assumir algumas simplificações conservativas. Para o pavimento tipo I-a e I-b, considera-se que a tensão resistente da laje pré-fabricada é igual à tensão resistente do betão colocado *in situ*, apesar de se ter demonstrado superior [23]. Para o pavimento tipo II-a e II-b considera-se que o betão entre as nervuras da laje mista é desprezado, isto é, o betão que permaneça abaixo da altura D_s não é considerado mesmo que se encontre à compressão [24].

3.2.4 Armadura transversal

A armadura de reforço transversal tem a função de transferir a força de corte longitudinal entre a laje e os conectores [23, 24, 25]. Para o cálculo da resistência ao corte longitudinal da laje por unidade de comprimento (ν_r), o SCI recomenda o disposto na norma BS 5950: parte 3.1, cláusula 5.6.3 [11]. Assim, tem-se

$$\nu_r = 0.7A_{sv}f_y + 0.03\eta A_{cv}f_{cu} \leq 0.8\eta A_{cv}\sqrt{f_{cu}}, \quad (3.39)$$

onde A_{cv} é a área da superfície de corte por unidade de comprimento e é definida dependendo do plano de corte a que se refere (plano *a* ou *b*), A_{sv} é área resistente de armadura de reforço que atravessa a superfície de corte (Figura 3.19). o valor de η é unitário para um betão de densidade normal, f_y é o valor característico da tensão de cedência do aço e f_{cu} é a tensão resistente característica do betão para provetes cúbicos [23, 24, 25].

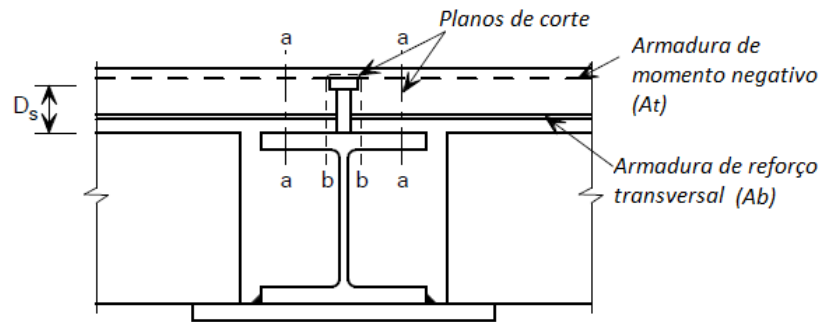


Figura 3.19: Planos de rotura ao corte [25].

No caso do plano de corte *a* da Figura 3.19, a área A_{sv} é definida pela soma da área de armadura de momento negativo (A_t) e a armadura de reforço transversal (A_b), por unidade de comprimento. O plano de corte *b* contabiliza duas vezes a armadura de reforço transversal A_b . O comprimento do plano de corte *a* é definido pela altura de betão acima do banzo superior metálico. Enquanto que, o comprimento do plano de corte *b*, é definido por $2h + d_h$ para a ligação com um conector e $2h + d_h + s_t$ para a ligação com dois conectores, onde h é a altura do conector, d_h é o diâmetro do conector e s_t é o espaçamento transversal entre conectores [23, 24, 25].

A armadura de reforço é dimensionada para uma força igual à que pode ser mobilizada pelos conectores. É possível calcular a força longitudinal gerada (ν), por unidade de comprimento, tendo em conta o espaçamento dos conectores (s), o número de conectores na secção (N) e o valor de cálculo da força resistente de cada conector (Q), segundo a seguinte expressão [23, 25]

$$\nu = \frac{NQ}{s}. \quad (3.40)$$

No caso de ligação ao corte por aderência, apenas existe um plano de corte, identificado na Secção 3.2.3, Figura 3.17 e A_{sv} apenas contabiliza a armadura de reforço transversal. A força longitudinal gerada, por unidade de comprimento (ν), é determinada de acordo com a expressão [24]

$$\nu = \frac{2F_{sb}(b_{eff} - b_b)r_s}{Lb_{eff}}, \quad (3.41)$$

onde b_b é a largura do banzo inferior da área sólida de betão e r_s é o factor de redução, contabiliza a média da força de corte longitudinal numa nervura na extremidade da viga, pode tomar o valor de 0.85 conservativamente, ou pode ser determinado de acordo com a expressão 3.42 [24]

$$r_s = \frac{L - 2b_s}{L}, \quad (3.42)$$

onde b_s é o espaçamento das nervuras.

A Equação 3.41 é conservativa, pois assume que a pior situação dá-se na extremidade da viga, ignora a contribuição das armaduras nas nervuras, e a acção de ligação dos diafragmas de extremidade [24].

3.3 Secção mista - estados limites de serviço

3.3.1 Controlo de Deformações

A verificação de segurança quanto à deformação de vigas *slim floor* deve ter uma maior importância devido à espessura reduzida deste tipo de vigas. De modo que a deformação não seja excessiva, é comum considerar que o menor vão é aplicado às vigas *slim floor* e o maior vão à laje. Segundo as publicações do Steel Construction Institute, o controlo de deformações da secção mista é calculado de acordo com a norma BS 5950: parte 3.1 [23, 24, 25].

Para uma viga sem escoramentos temporários, a deformação (δ_q) devido às sobrecargas (q) deve ser baseada nas propriedades da secção mista, enquanto que a deformação (δ_p) devido à cargas permanentes (p) deve ser baseada apenas nas propriedades da secção metálica. No entanto, para vigas com escoramentos temporários, todas as deformações devem ser baseadas nas propriedades da secção mista [11].

Para vigas simplesmente apoiadas, o cálculo das deformações deve ser baseado nas propriedades elásticas não fendilhadas da secção [23, 11]. Alguns testes executados pelo SCI a pavimentos do tipo II-b, com ligação ao corte por aderência, mostraram que pode ser utilizada a inércia não fendilhada para o cálculo da rigidez da secção mista. As expressões para a determinação da linha neutra elástica (y_e) e do momento de inércia (I_c) da secção mista são dadas no Anexo B, adaptadas das publicações do SCI [24, 23]. Desta forma, para uma viga simplesmente apoiada sem escoramentos temporários, δ_q é dado por

$$\delta_q = \frac{5qL^4}{384(EI)_c}, \quad (3.43)$$

e δ_p é dado por

$$\delta_p = \frac{5pL^4}{384(EI)_m}, \quad (3.44)$$

onde $(EI)_m$ e $(EI)_c$ são as rigidezes da secção metálica e da secção mista, respectivamente.

O limite de deformação imposto para δ_q é de $L/360$ [10]. No entanto, também se deve realizar o controlo da deformação (δ_{tot}) em relação à carga total não majorada (permanente e sobrecarga), com um limite de $L/200$ [10].

Para uma viga contínua, a deformação quanto às sobrecargas (q) deve ser baseada nas cargas aplicadas ao vão em causa e nos momentos na extremidade (determinados segundo a Secção 6.1.3.2 e 6.1.3.3 BS 5950: Parte 3.1). O cálculo da deformação quanto às cargas permanentes (p), deve ser baseado numa análise elástica da viga. Para uma viga sem escoramentos temporários, devem ser usadas as propriedades da viga metálica. Quanto a vigas com escoramentos temporários devem ser usadas as propriedades não fendilhadas da secção mista [11]. O cálculo da deformação a meio-vão (δ), considerando um carregamento uniforme ou cargas pontuais simétricas, pode ser determinado pela expressão geral

$$\delta = \delta_0 \frac{(1 - 0.6)(M_1 + M_2)}{M_0}, \quad (3.45)$$

onde δ_0 é a deformação a meio-vão para uma viga simplesmente apoiada com o mesmo vão, para o mesmo carregamento. M_0 é o momento máximo na viga simplesmente apoiada e M_1 e M_2 são os momentos nas extremidades da viga contínua (com as modificações referidas). Os limites para a deformação são iguais aos referidos anteriormente.

3.3.2 Controlo de Vibrações

O facto de o sistema *slim floor* ser um pavimento de espessura reduzida, pode levar a uma maior sensibilidade da estrutura quanto ao fenómeno das vibrações. Desta forma, é importante limitar a frequência natural da estrutura (f_n) [23].

Segundo o SCI, o limite inferior da frequência natural para o controlo das vibrações é de 4Hz. As cargas consideradas para o cálculo da máxima deformação na viga (δ_w), são a totalidade das cargas permanentes (p) e 10% da sobrecarga (q). Note-se que, neste caso, a carga correspondente às paredes divisórias não é incluída pois influenciam no amortecimento da estrutura [23]. A frequência natural da viga simplesmente apoiada pode ser determinada aproximadamente segundo a expressão

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta_w}}. \quad (3.46)$$

A deformação δ_w é determinada para vigas simplesmente apoiadas, sendo dada por

$$\delta_w = \frac{5(p + 0.1q)L^4}{384EI}. \quad (3.47)$$

Note-se que a equação (3.46) é dimensional e para respeitar as dimensões da expressão, δ_w tem de ser apresentada em mm [23].

Esta equação tem origem na expressão da frequência natural, para vibrações livres, dada por [28]

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3.48)$$

onde k é a rigidez do sistema e m a massa (considera-se 10% da sobrecarga também contabilizada na massa).

Para expressar a equação (3.48) em função da deformação (δ) causada pela peso da massa (m) [28], tem-se que

$$\delta = \frac{mg}{k}, \quad (3.49)$$

onde g é a aceleração da gravidade. Como a viga apresenta a massa distribuída, a deformação δ é apresentada como uma média ponderada das deformações na viga, para a massa considerada [28]. Desta forma, obtém-se

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}}. \quad (3.50)$$

Como se pretende que a deformação seja apresentada em mm, a equação (3.50) é modificada da seguinte forma

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta \times 10^{-3}}}. \quad (3.51)$$

Segundo a publicação [28], a deformação δ é cerca de 3/4 da máxima deformação

na viga δ_w , e $g = 9.81m/s^2$, obtém-se

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\frac{3}{4}\delta_w \times 10^{-3}}} \approx \frac{18}{\sqrt{\delta_w}}. \quad (3.52)$$

3.4 Programação em MATLAB

Durante o decorrer deste trabalho foi desenvolvido um programa de cálculo automático, com o objectivo de proceder à verificação da segurança da viga mista em relação aos estados limites últimos (ELU) e aos estados limites de serviço (ELS).

Numa primeira interface (Figura 3.20), com o nome `Propriedades_da_viga_metalica`, solicita-se ao utilizador que defina a secção metálica a utilizar, do tipo IFB ou SFB. Após se escolher o tipo de secção, é apresentada uma lista com as várias opções dimensionais. Esta lista foi retirada dos catálogos da empresa Arcelor [8].

Seleccionando o botão `Obter Propriedades` é possível visualizar uma lista das propriedades geométricas, elásticas e plásticas da secção. Seleccionando o botão `Seguinte`, o utilizador é direccionado para uma segunda interface gráfica, com o nome de `Resistência_da_viga_mista_slim_floor` (Figura 3.21). Nesta segunda interface, definindo geometricamente a secção mista, os valores dos esforços actuantes e materiais utilizados, é possível proceder à verificação da segurança segundo as publicações do SCI e a norma BS 5950: parte 3.1.

A definição dos vãos e esforços actuantes é realizada pelo utilizador, preenchendo os dados requeridos no quadro denominado `Dimensões e esforços actuantes`. Neste quadro, é requerido ao utilizador os seguintes dados: o momento actuante positivo e negativo (M_{Ed+} e M_{Ed-}), o esforço transversal actuante positivo e negativo (V_{Ed+} e V_{Ed-}), o vão da viga mista (L), o vão da laje ($L1$ e $L2$), largura efectiva do banzo de betão (b_{eff}) e o recobrimento das armaduras (rec).

O programa permite a verificação da segurança dos pavimentos definidos no Capítulo 3 (pavimentos tipo, I-a, I-b, II-a e II-b Figura 3.1). Desta forma, depois de realizar os passos supracitados, é necessário definir o tipo de laje (maciça pré-fabricada ou mista) e o tipo de ligação total ao corte (com conectores ou por aderência) através dos quadros denominados `Definição do tipo de laje utilizada` e `Definição da ligação ao corte`, respectivamente.

Propriedades_da_viga_metalica

Tipo de Secção

Designação comercial da secção

Escolha a Secção a Utilizar:

1/2 IPE O 600, 430 x 20

Obter Propriedades da Secção

Nota: A base de dados utilizada tem como fonte o catálogo da "Profil Abed"

Visualizar secção

Propriedades da Secção

bp = 430 (mm)

tp = 20 (mm)

G = 144.7 (kg/m)

heff = 305 (mm)

b = 224 (mm)

tw = 15 (mm)

tf = 24 (mm)

r = 24 (mm)

A = 184.4 (cm²)

Iy = 34207 (cm⁴)

wely = 1815 (cm³)

z1 = 13.7 (cm)

z2 = 18.8 (cm)

wply = 2237.01 (cm³)

Seguinte

Diagrama de uma secção metálica tipo B (IPE) com dimensões: b_p , t_p , t_w , r , h_{eff} , $h/2$, z_1 , z_2 , b , t_f , t_p , Y .

Diagrama de uma secção metálica tipo A (Slim Floor Beam) com dimensões: b , t_p , $h_{eff} = h/2$, t_w , r , z_1 , z_2 , b_p , t_p , Y .

Figura 3.20: Interface gráfica para escolha da secção metálica e definição da suas propriedades.

Resistencia_da_viga_mista_slim_floor

Dimensões e esforços actuantes

Comprimento da viga "slim floor" (L): 8 (m)

Vão L1: 5 (m) Vão L2: 5 (m)

beff 1000 (mm) rec 35 (mm)

Med+ 96 (kN m) Med- 0 (kN m)

Ved+ 48 (kN) Ved- 48 (kN)

Definição do tipo de laje utilizada

☐ Laje maciça pré-fabricada

☒ Laje mista/chapa metálica nervurada

Definição da ligação ao corte

☐ Ligação total ao corte com conectores

☒ Ligação total ao corte sem conectores (ligação contínua)

Figura 1-Dimensões do sistema "slim floor"

Figura 2-Definição da secção transversal mista da viga

Dimensões da secção transversal mista da viga

Dd 305 (mm) Ds 50 (mm)

Materials

Classe de betão e de aço: C25/30 S275

	f _{cu}	30	MPa	E _{cm}	31	GPa
f _{cm}	33	MPa	p _y	265	MPa	
f _{ctm}	2.6	MPa	f _{tu}	430	MPa	
f _{cd}	16.67	MPa	E _s	205	GPa	

nº de varões na largura beff (armadura da laje): 6

Diâmetro dos varões (mm): 12

nº de ramos dos estribos: 0

Área de um ramo de estribos (cm²/2m): 0

Classe de aço: A500 f_{yd} 435 MPa

Verificação dos Estados Limites Últimos

Verificação da resistência à flexão

M_{pl,Rd+} 764.604 (kN m) verifica

M_{pl,Rd-} 670.264 (kN m) verifica

Verificar

Verificação da resistência da ligação

N: 0 Q: 0 (kN) S: 0 (m)

R_{cp,os} 675 (kN) verifica

R_{cn,egt} 0 (kN) verifica

F_{sb} 1280.4 (kN) Verificar

Verificação da armadura de reforço transversal

A_{cv} 150 (mm) A_b 142 (mm)

b_s 600 (mm) b_b 300 (mm)

Resistência da laje ao corte longitudinal: 178.239 (kNm)

rs 0.85

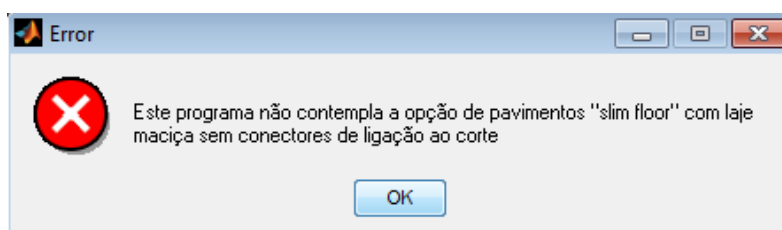
Força longitudinal de corte gerada: 100.406 (kNm)

verifica Verificar

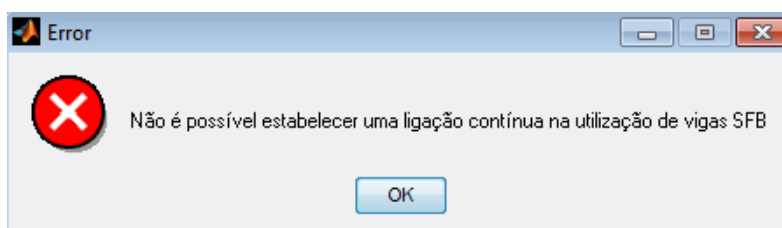
Anterior Seguinte

Figura 3.21: Interface gráfica para verificação da resistência da secção mista em estados limites últimos.

Se o utilizador seleccionar em simultâneo as opções laje maciça pré-fabricada e ligação total ao corte sem conectores (contínua), o programa não contempla esta opção e produz a mensagem de erro representada na Figura 3.22(a). No caso de se escolher uma viga do tipo SFB, não é permitido ao utilizador a escolha de uma ligação total ao corte sem conectores, uma vez que esta viga não apresenta nervuras no topo do banzo superior e, portanto, a aderência entre os materiais (aço-betão) não é significativa (Figura 3.22(b)).



(a)



(b)

Figura 3.22: Mensagens informativas.

Posteriormente, é necessário definir a espessura de betão colocado *in situ* (D_s), a altura da chapa nervurada ou da laje maciça (D_d e D_{pc}), a classe de resistência dos materiais utilizados e a quantidade de armadura colocada na secção. Este processo pode ser realizado através dos preenchimento dos quadros Dimensões da secção transversal mista da viga e Materiais.

Após a definição de todos os dados necessários pode-se proceder à verificação dos estados limites últimos. A verificação quanto à resistência ao momento flector é realizada de acordo com o explicitado na Secção 3.2.2. No quadro denominado Verificação da resistência à flexão é apresentado o valor do momento plástico e a condição da verificação da resistência à flexão.

Neste programa também é realizada a verificação da resistência da conexão para conexão total ao corte, com conectores e por aderência, de acordo com o explicitado na Secção 3.2.3. No quadro denominado Verificação da resistência da ligação, é requerido ao utilizador a introdução do número de conectores utilizados (N), a resistência do tipo conectores usados

(Q) e o espaçamento entre eles (s). Desta forma, procede-se ao cálculo da força resistente de ligação ao corte. No caso da ligação ser por aderência, os valores supracitados não são necessários na verificação da resistência, sendo necessária a definição dos valores máximos de esforço transversal ($VEd+$ e $VEd-$) como já foi referido para o cálculo do comprimento crítico (L_{cr}), para a determinação da força de corte F_{sb} na conexão por aderência. Se a viga for simplesmente apoiada o valor do esforço transversal é simétrico e L_{cr} é metade do vão da viga. Note-se que a verificação da resistência da ligação por aderência só é possível para vigas simplesmente apoiadas.

A verificação da armadura de reforço transversal é realizada de acordo com o apresentado na Secção 3.2.4. Para isso, o utilizador tem de introduzir os dados requeridos no quadro intitulado Verificação da armadura de reforço transversal. Como se pode observar nas Figuras 3.23(a) e 3.23(b), os dados necessários diferem, consoante se considere a conexão ao corte com conectores ou conexão por aderência.

Seleccionando o botão Seguinte é-se direccionado para uma terceira interface gráfica (Figura 3.24), intitulada Resistência_da_viga_mista_slim_floo_ELS, com o objectivo de se realizar a verificação da resistência da viga mista quanto aos estados limites de serviço, ou seja, controlo da deformação e vibração, segundo o estipulado na Secção 3.3. Note-se que esta verificação só é possível para vigas simplesmente apoiadas, no entanto, é possível, permite a determinação da rigidez da secção mista.

3.4.1 Exemplos de aplicação e validação do programa

Pretende-se realizar uma comparação entre os resultados obtidos pelo programa desenvolvido em MATLAB e os resultados apresentados em dois exemplos de cálculo das publicações do SCI [23, 24].

Exemplo 1 [23]

O primeiro exemplo de cálculo, retirado da publicação [23] consiste na verificação da segurança para uma viga do tipo I-a com as dimensões definidas segundo a Figura 3.25. A viga é simplesmente apoiada com um vão (L) de 8 m. Os vãos das lajes adjacentes (L_1 e L_2) também são de 8 m. Na publicação [23], a classe do betão utilizada é equivalente à classe C25/30 e a classe de aço da secção metálica é equivalente à classe S355, utilizadas no programa em MATLAB. No entanto, a classe de aço das armaduras transversais utilizadas no programa é a A500, enquanto que na publicação [23] a tensão de cedência característica dos varões (f_y) é de 460 MPa. A área da armadura da laje (A_t) é de $142 \text{ mm}^2/\text{m}$ e a

Verificação da armadura de reforço transversal

At: (mm) Ab: (mm)

dh: (mm) h: (mm)

Resistência da laje ao corte longitudinal(a): 2502.8 (kN/m)

Resistência da laje ao corte longitudinal(b) 0.85 (kN/m)

Força longitudinal de corte gerada: 761.838 (kN/m)

verifica

(a) ligação ao corte com conectores

Verificação da armadura de reforço transversal

Acv: (mm) Ab: (mm)

bs: (mm) bb: (mm)

Resistência da laje ao corte longitudinal: 2502.8 (kN/m)

rs 0.85 (kN/m)

Força longitudinal de corte gerada: 761.838 (kN/m)

verifica

(b) ligação ao corte por aderência

Figura 3.23: Quadro de verificação da armadura de reforço transversal.

Resistencia_da_viga_mista_slim_floor_...

Verificação dos estados limites de serviço

Controlo da deformação

q: 22.5 (kN/m) g: 17.35 (kN/m)

deformação(I): 0.0062026 $\leq L/360$ OK!

deformação(tot): 0.0193982 $\leq L/200$ OK!

EI: 193467 (kN m²) Verificar

Controlo de vibrações

q: 22.5 (kN/m) g: 17.35 (kN/m)

fn(aprox) 6.96394 ≥ 4 Hz verifica

Verificar

Figura 3.24: Interface gráfica para verificação da resistência da secção mista aos estados limites de serviço.

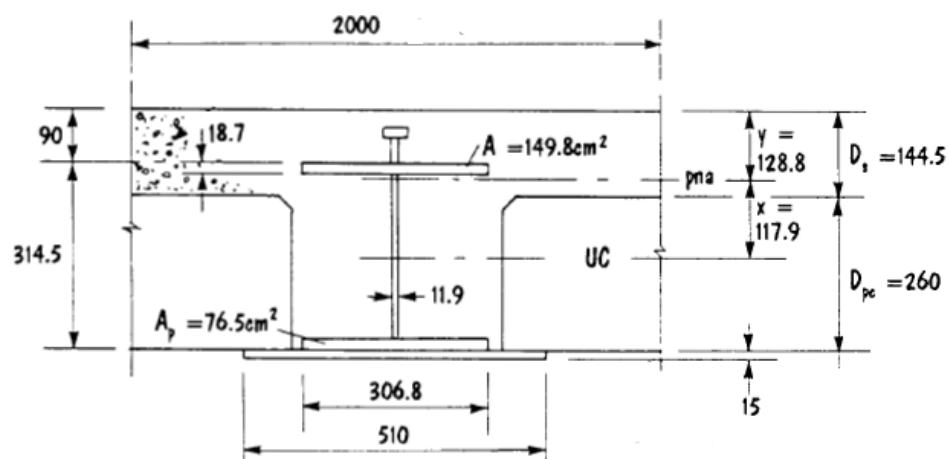


Figura 3.25: Definição das dimensões do Exemplo 1 (exemplo 3 da publicação [23]).

àrea da armadura de reforço ao corte (A_b) é de $372.2 \text{ mm}^2/\text{m}$. A força resistente característica dos conectores (Q_k) é de 87 kN e o espaçamento transversal entre conectores (s) é de 0.18 m. Desta forma, os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 3.4.1.

Parâmetro	Publicação [23]	P. Matlab	Erro relativo (%)
x (mm)	117.9	114.6	2.8
y_p (mm)	128.8	132.6	3.0
R_c (kN)	3493.8	3580.5	2.5
$N_{px}Q_p^*$ (kN)	3549.6	3619.2	2.0
ν_{ra} (kN/m)	246.6	237.6	3.6
ν_{rb} (kN/m)	393.6	380.57	3.3
y_e (mm)	188.7	179.9	4.7
EI (kN m^2)	224011.7	224246	0.1
δ_i (mm)	10.7	10.6	0.9
f_n (Hz)	4.5	4.4	2.2

Tabela 3.3: Comparação entre os resultados da publicação P110 e o programa em Matlab [23]

Exemplo 2 [24]

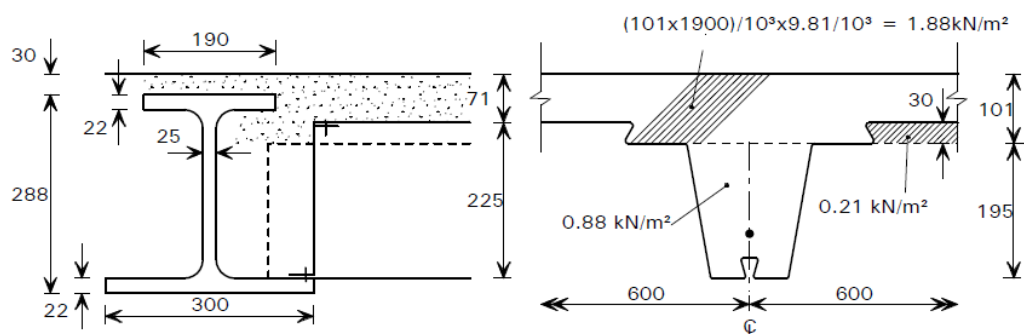


Figura 3.26: Definição das dimensões do pavimento tipo II-b, conexão por aderência, Exemplo 2 (exemplo da publicação [24]).

O segundo exemplo de cálculo, retirado da publicação [24] consiste na verificação da segurança para uma viga do tipo II-b com as dimensões definidas segundo a Figura 3.26. A viga é simplesmente apoiada com um vão (L) de 6 m. Os vãos das lajes adjacentes (L_1 e L_2) também são de 6 m. A classe de aço da secção metálica, a classe do betão e a classe dos varões de aço são iguais às apresentadas para o Exemplo 1. A área da armadura da laje (A_t) é de $142 \text{ mm}^2/\text{m}$. Desta forma, os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 3.4.1.

A diferença entre os resultados obtidos no programa e os resultados registados na publicação [23], Exemplo 1 (Tabela 3.4.1) é inferior a 4.7%. No entanto, a

Parâmetro	Publicação P175 SCI	P. Matlab	Erro relativo (%)
y_p (mm)	170.6	170.3	0.2
F_{sb} (mm)	997.9	997.9	0.0
R_c (kN)	898.6	898.6	0.0
$M_{pl,Rd}$ (kN m)	757.7	747.4	1.4
ν_r (kN/m)	144.3	141.9	1.7
ν (kN/m)	136.9	136.9	0.0
y_e (mm)	134.8	134.5	0.2
EI (kN m^2)	68162.5	68099.5	0.1
δ_i (mm)	16.3	16.3	0.0
δ_{tot} (mm)	34.2	34.3	0.3
f_n (Hz)	4.8	4.8	0.0

Tabela 3.4: Comparação entre os resultados da publicação P175 e o programa em Matlab [24]

diferença entre os resultados obtidos no programa e os resultados registados na publicação [24], Exemplo 2 (Tabela 3.4.1) é inferior a 1.7%. É de referir que, os resultados registados nas publicações referidas também apresentam erros de arredondamento. Note-se que a diferença nos resultados de ν_r , em ambos os exemplos, deve-se também ao facto de se utilizar uma tensão de cedência característica dos varões de aço diferente.

Capítulo 4

Casos de Estudo

4.1 Estudo da resistência da secção mista à flexão

Como caso de estudo, pretendia-se inicialmente apresentar o estudo da carga resistente à flexão da secção mista ao longo do vão, através do programa realizado em MATLAB, considerando variados perfis metálicos comercializados, com o objectivo de comparar os resultados com as tabelas apresentadas pela empresa ArcelorMittal [8]. No entanto, verificou-se que os resultados da carga resistente à flexão apresentados pelo fabricante apenas diziam respeito à secção metálica e não à secção mista. Por esse motivo, optou-se por modificar os casos de estudo a realizar.

Nesta secção é efectuado o estudo da resistência à flexão da secção mista definida pelos pavimentos *slim floor* do tipo I-a, I-b, II-a, II-b, definidos no Capítulo 3, para vigas simplesmente apoiadas. Para tal, são utilizados 4 grupos de perfis metálicos (G1, G2, G3 e G4) comercializados pela empresa ArcelorMittal [8]. Os grupos G1 e G2 são secções metálicas do tipo SFB, utilizados para os pavimentos do tipo I-a e I-b, enquanto que o grupo G3 e G4 são vigas do tipo IFB utilizadas para pavimentos do tipo II-a e II-b. Cada grupo apresenta a espessura total do pavimento (e) constante, conforme definido na Tabela 4.1.

O critério utilizado para a obtenção das espessuras indicadas na Tabela 4.1 consiste na consideração da altura da laje maciça (D_{pc} , pavimento tipo I-a e II-a) ou da chapa nervurada (D_d , pavimento tipo I-b e II-b) igual à altura efectiva do perfil metálico (h_{eff}). Posteriormente, considerou-se uma espessura de revestimento acima do perfil metálico no mínimo de 70 mm, de modo a permitir a colocação da armadura necessária e dos conectores metálicos.

Tendo sido definidas as secções mistas a utilizar, são efectuados os seguintes casos de estudo,

- Caso 1.1: Resistência à flexão de pavimentos tipo I-a e I-b usando os grupos

Grupo	Perfil [8]	$D_{pc/d}$ (mm)	D_s (mm)	e (mm)
G1	HEB 140+340x10	140	90	230
	HEM 140+350x15	160	70	
	HEB 160+360x10			
G2	HEM 160+370x15	180	90	270
	HEB 180+380x15			
	HEM 180+390x15	200	70	
G3	1\2 HE 220M+430x15	120	95	215
	1\2 HE 240M+450x20	135	80	
	1\2 HE 260M+470x20	145	70	
G4	1\2 HP 400x140+190x40	200	70	270
	1\2 HP 400x158+190x40			
	1\2 HP 400x194+190x40			

Tabela 4.1: Grupos de perfis metálicos utilizados na parametrização da resistência à flexão da secção mista e definição da espessura total do pavimento

G1 e G2. Para tal, tem-se como parâmetros constantes o perfil metálico utilizado, a classe de betão (C25/30) e a espessura total do pavimento, e como parâmetros variáveis o comprimento da viga. A resistência à flexão é determinada calculando o momento plástico resistente (M_{Rd}) da secção através do programa elaborado em MATLAB (Secção 3.4) e representado graficamente.

- Caso 1.2: Resistência à flexão de pavimentos tipo II-a e II-b, usando os grupos G3 e G4. Para tal, tem-se como parâmetros constantes o perfil metálico utilizado, a classe de betão (C25/30) e a espessura total do pavimento, e como parâmetros variáveis o comprimento da viga.
- Caso 2: Resistência à flexão de pavimentos com classe de betão C25/30 e C30/37, usando grupos G1, G2 e G3. Para tal, tem-se como parâmetros constantes o perfil metálico utilizado, a espessura total do pavimento e o tipo de pavimento, e como parâmetros variáveis o comprimento da viga.

4.2 Análise de Resultados

4.2.1 Caso 1.1

No gráfico apresentado na Figura 4.1 pode-se observar que os resultados obtidos para momento plástico resistente (M_{Rd}), da secção mista definida pelo perfil metálico HEB 140+340x10 para o pavimento I-b, são muito próximos dos resultados obtidos para o pavimento I-a. Para o pavimento I-a, a secção apresenta o valor do momento plástico resistente superior em 2.6 % para o vão de 4m e valor coincidente (diferença de 0 %) para o vão de 9 m em relação ao pavimento I-b. A proximidade dos resultados deve-se ao facto de, em ambos os casos, a linha neutra plástica se encontrar posicionada no banzo superior metálico. Desta forma, a laje maciça utilizada no pavimento I-a, por se encontrar à tracção, não contribui

para a resistência da secção à flexão, aproximando-se da solução obtida para o pavimento I-b, que apenas contabiliza a resistência do betão acima da nervuras da laje mista. O valor do momento plástico resistente situa-se entre os 314 e os 402 kNm.

A secção mista definida pelo perfil metálico HEB 160+360x10, pavimento I-a, apresenta valores do momento plástico resistente superiores aos obtidos para o pavimento I-b, na ordem dos 11.7 % para o vão de 4m e de 0.2 % para o vão de 9 m. Neste caso, a laje maciça de betão contribui para a resistência da secção até ao vão de 7 m, afastando-se ligeiramente da resistência obtida para o pavimento I-b.

Pode-se verificar que os resultados obtidos para a secção mista definida pelo perfil metálico HEB 140+350x15, pavimento I-a, apresentam uma diferença significativa face aos resultados do pavimento I-b: 23.9% para o vão de 4 m e 3.9% para o vão de 9 m.

Numa apreciação geral, verifica-se que as secções mistas que utilizam o perfil metálico HEB 140+340x10 são as menos resistentes à flexão do grupo G1, pois apesar de apresentarem uma espessura de betão superior acima da secção metálica, a altura do perfil e a largura dos banzos são inferiores aos restantes perfis. Em relação às secções mistas que utilizam os perfis HEB 140+350x15 e HEB 160 360x10 com a mesma altura efectiva e espessura de betão acima da secção metálica, a mais resistente é a primeira, devido à espessura do banzo adicional (t_p) e à espessura do banzo da secção HEB (t_f) serem superiores aos da secção HEB 160+360x10.

No gráfico representado na Figura 4.2, a secção mista que utiliza o perfil metálico HEB 160+370x15, pavimento I-a, apresenta valores do momento plástico resistente superiores aos obtidos para o pavimento I-b, na ordem dos 13.4 % para o vão de 4m e de 0.7 % para o vão de 9 m. No caso das secções mistas compostas pelo perfil metálico HEB 180+380x15, as diferenças entre ambas são na ordem dos 22.1 % e de 0.3 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente. Por último, para as secções que utilizam o perfil HEB 180+390x15 tiveram diferenças de cerca de 21.0 % e 3.7%.

Em ambos os gráficos (Figuras 4.1 e 4.2), é possível observar que, para vãos menores, os resultados para os pavimentos tipo I-a e tipo I-b têm uma maior diferença entre si. À medida que se aumenta o vão a diferença vai diminuindo, convergindo para o mesmo resultado. Este resultado deve-se ao facto de a largura efectiva do banzo de betão aumentar à medida que o vão aumenta e,

simultaneamente, a linha neutra plástica sobe, tornando-se próxima da posição do banzo superior metálico. Desta forma, a solução do pavimento tipo I-a tende a convergir para a solução do pavimento tipo I-b.

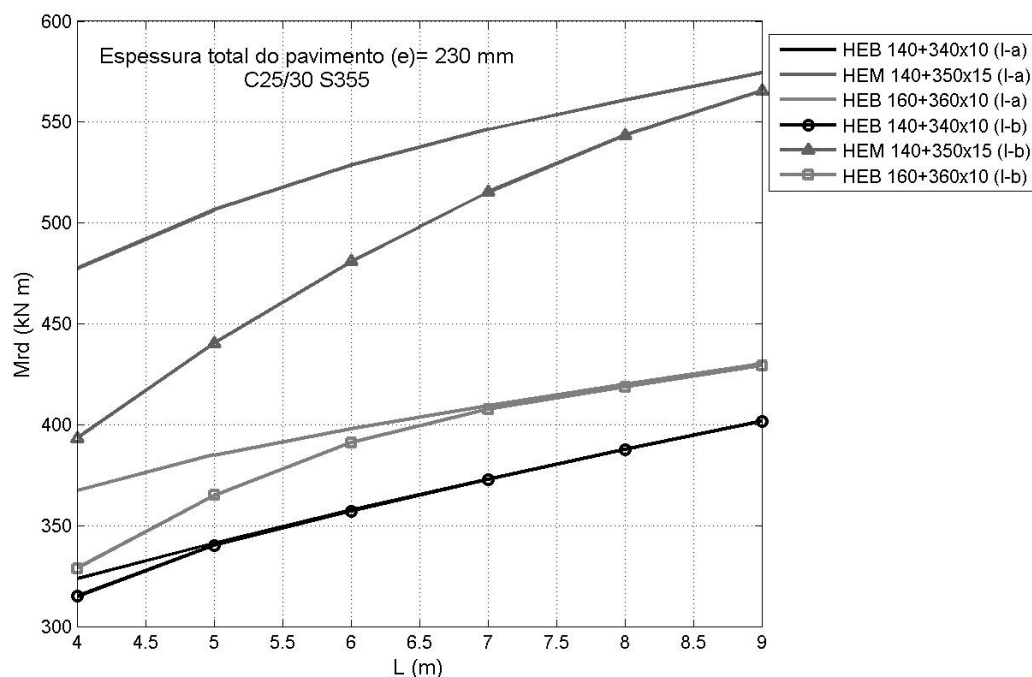


Figura 4.1: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a e I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G1).

4.2.2 Caso 1.2

No gráfico apresentado na Figura 4.3 verifica-se que os valores obtidos para as secções mistas compostas pelo perfil metálico 1/2 HE 220M+430x15, para o pavimento II-a e II-b, apresentam diferenças entre os 1.8 % e os 2.7 %, ao longo dos vãos definidos. Observa-se que existe um comportamento quase linear no aumento do momento plástico resistente em relação ao vão. O mesmo se pode aplicar às secções mistas que utilizam os restantes perfis do grupo G3, sendo que as diferenças entre as secções do pavimento II-a e II-b são entre os 3.0 % e os 3.4 %. No entanto, o valor do momento plástico resistente, para o perfil 1/2 HE 260 M+470x20, vão igual a 4 m, apresenta uma diferença inferior à indicada, na ordem dos 1.2 %.

Para o gráfico disposto na Figura 4.4 e à semelhança do referido para o gráfico da Figura 4.3, observa-se um comportamento quase linear do traçado para todas

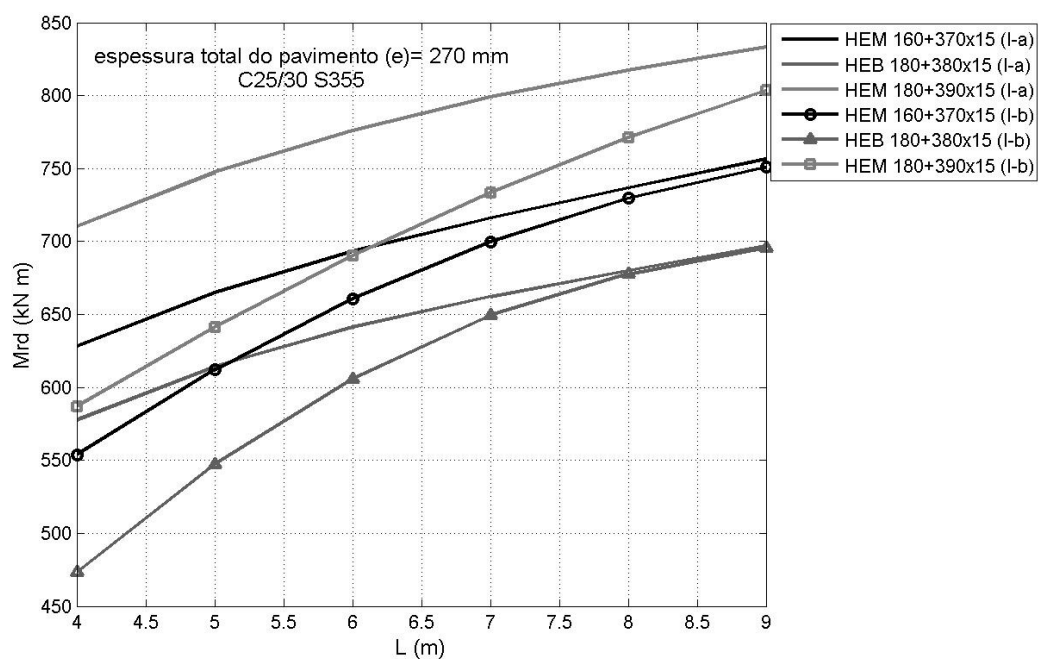


Figura 4.2: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a e I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G2).

as secções mistas que utilizam os perfis metálicos do grupo G4. A diferença entre os resultados do pavimento tipo I-a e I-b, são semelhantes para os três perfis metálicos do grupo, situando-se entre os 1.4 e os 2 %.

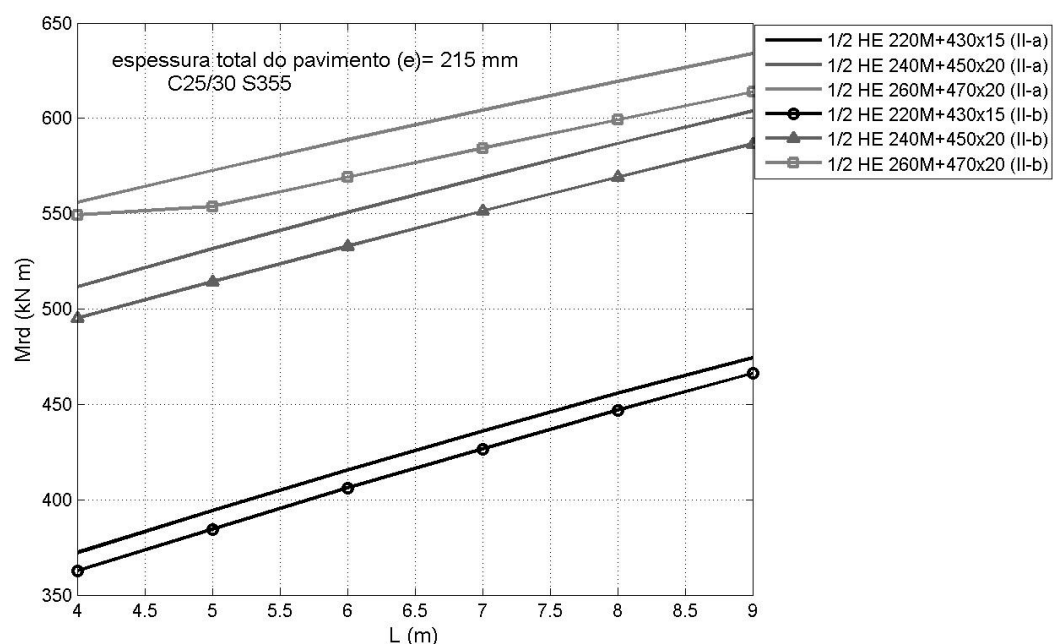


Figura 4.3: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo II-a e II-b, para a espessura total do pavimento constante (e=215 mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G3).

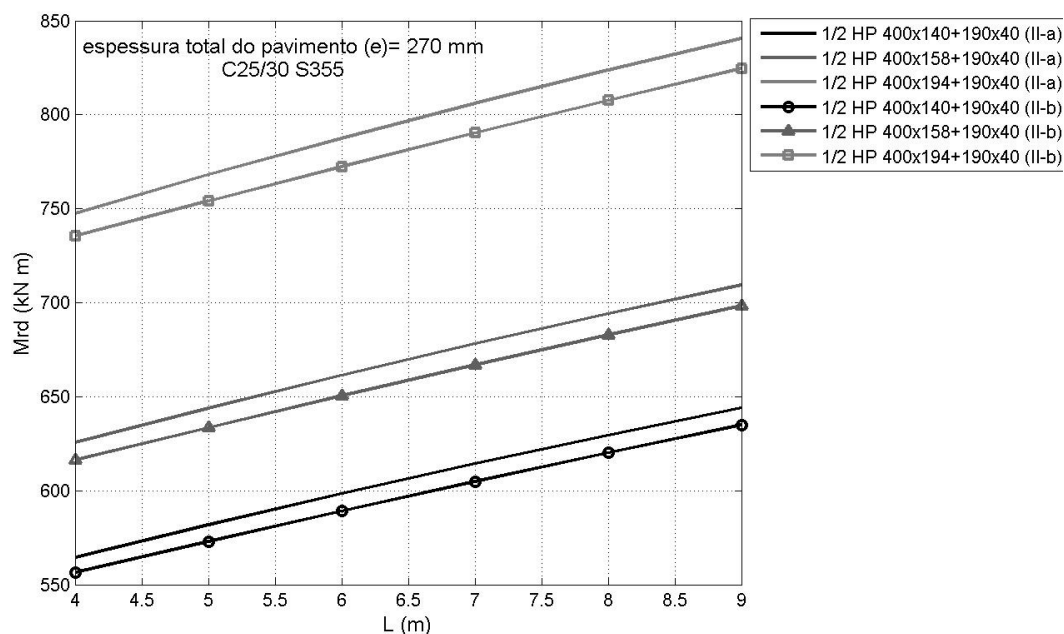


Figura 4.4: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo II-a e II-b, para a espessura total do pavimento constante (e=270 mm), classe de betão C25/30 (perfis metálicos G4).

4.2.3 Caso 2

Como se pode observar nos gráficos apresentados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.11 e 4.12, o aumento da resistência do betão produz um aumento do momento plástico resistente para todas as secções mistas estudadas. Mantendo os parâmetros geométricos da secção e aumentando a resistência do betão para C30/37, ao se realizar o equilíbrio entre a zona de compressão e de tracção, a linha neutra plástica tende a tomar uma posição superior quando comparada com a posição para a classe de betão C25/30.

Para as secções mistas definidas pelos pavimentos tipo I-a e II-a (utilização de laje maciça), apesar da espessura de betão à compressão diminuir com a subida da linha neutra plástica, a utilização de uma classe de betão superior prevalece, provocando o aumento do momento plástico resistente. Para as secções do tipo I-b e II-b (utilização de laje nervurada), apesar da subida da posição da linha neutra plástica, esta continua posicionada sobre a alma, mantendo-se a espessura de betão comprimida. Desta forma, apesar da distância da força de compressão do banzo de betão à linha neutra diminuir, o aumento da resistência do betão produz o aumento do momento plástico resistente da secção.

Para as secções mistas representadas nos gráficos das Figuras 4.5 e 4.7, o momento plástico resistente para uma classe de betão C25/30 é 4% a 6% inferior do que para uma classe C30/37.

No caso do gráfico representado na Figura 4.6, para a secção mista composta pelo perfil metálico HEB 140+340x10, a diferença dos resultados do momento plástico resistente entre uma classe de betão C30/37 e C25/30 é de 7.6 % e 6.5 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente. A secção mista composta pelo perfil HEM 140+350x15, apresenta diferenças de 11.1 % e 5.3 %. Quanto à secção mista que utiliza o perfil HEB 160+360x10 as diferenças são de 10.3 % e 4.8 %.

Para o gráfico representado na Figura 4.8, para a secção mista que utiliza o perfil HEM 160+370x15, a diferença dos resultados do momento plástico resistente entre uma classe de betão C30/37 e C25/30 é de 9.8 % e 5.4 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente. A secção mista composta pelo perfil HEB 180+380x15, apresenta diferenças de 14.7 % e 5.0 %. Quanto à secção mista que utiliza o perfil HEM 180+390x15 as diferenças são de 8.6 % e 6.1 %.

As soluções das secções mistas representadas graficamente nas Figuras 4.9 e 4.10, que utilizam o perfil 1/2 HE 220M+430x15 (classe de betão C25/30 e C30/37), diferem entre si em cerca de 6.0 % e 8.0 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente. A secção mista composta pelo perfil 1/2 HE 240M+450x20,

apresenta diferenças de cerca de 3.6 % e 5.6 %. Quanto à secção mista que utiliza o perfil 1/2 HE 260 M+470x20 as diferenças são entre 1 a 2.8 % e 4.6 %, para o vão de 4 m e 9 m, respectivamente.

O valor do momento plástico resistente das secções mistas representadas graficamente na Figura 4.11 e 4.12, que utilizam o perfil 1/2 HP 400x140+190x40 (classe de betão C25/30 e C30/37), diferem entre si em cerca de 2.8 % e 4.5 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente. A secção mista composta pelo perfil 1/2 HP 400x158+190x40, apresenta diferenças de cerca de 2.7 % e 4.5 %. Quanto à secção mista que utiliza o perfil 1/2 HP 400x198+190x40 as diferenças são cerca de 2.8 % e 4.6 %.

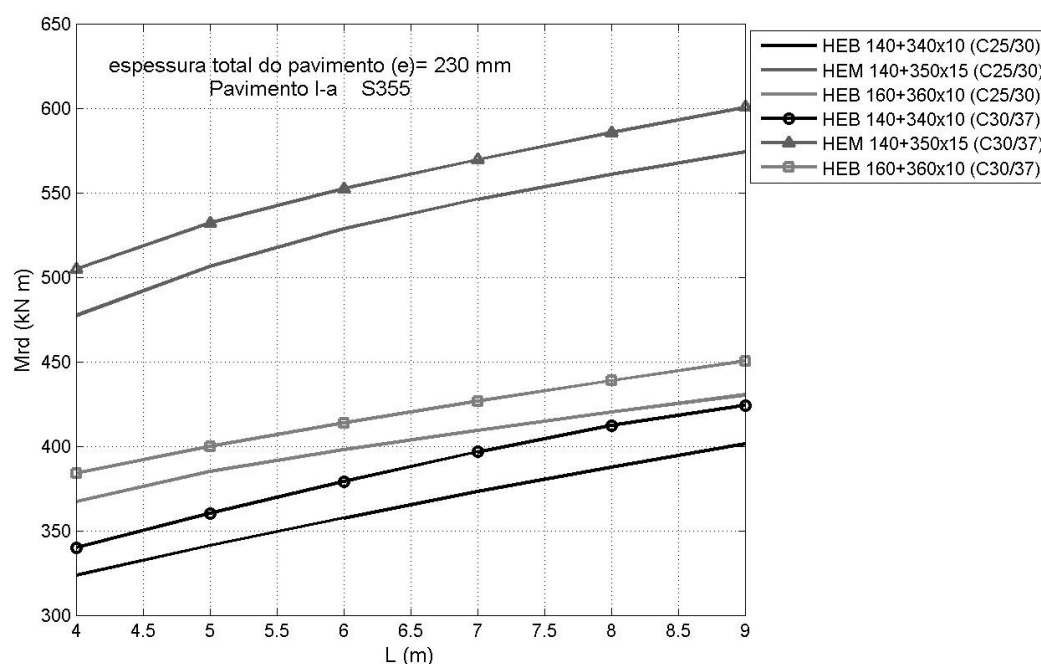


Figura 4.5: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), (perfis metálicos G1), Classe de betão C25/30 e C30/37.

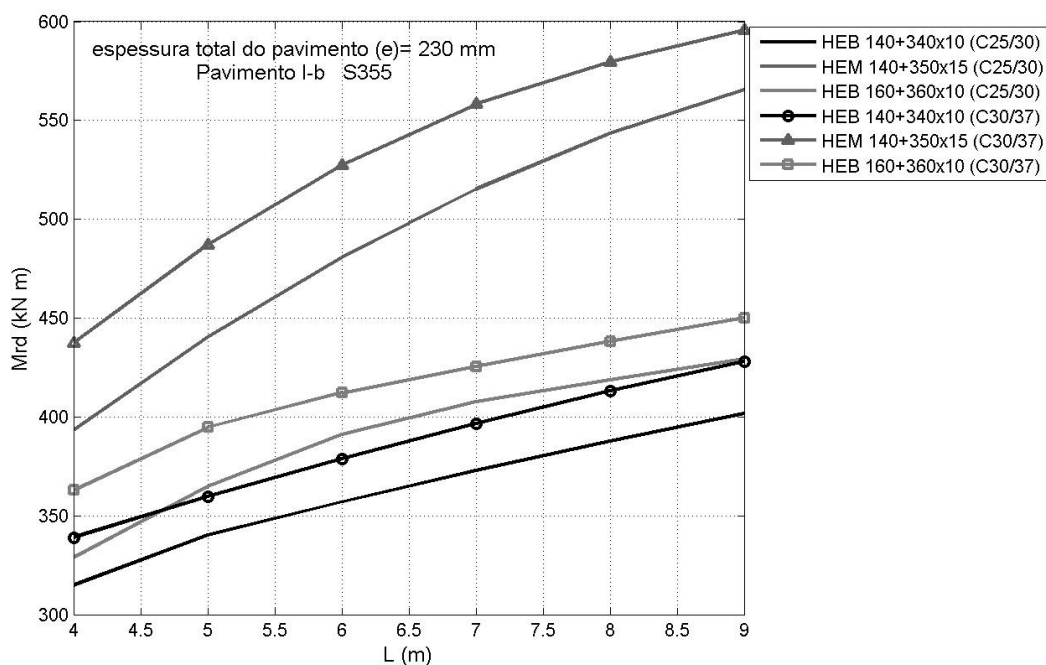


Figura 4.6: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=230$ mm), (perfis metálicos G1), Classe de betão C25/30 e C30/37.

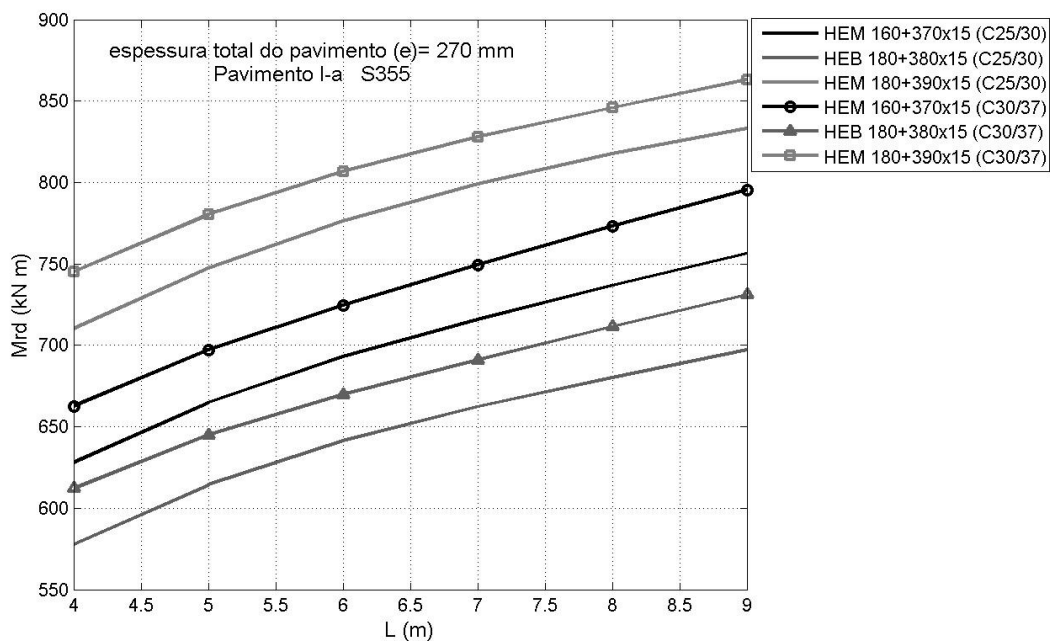


Figura 4.7: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G2), Classe de betão C25/30 e C30/37.

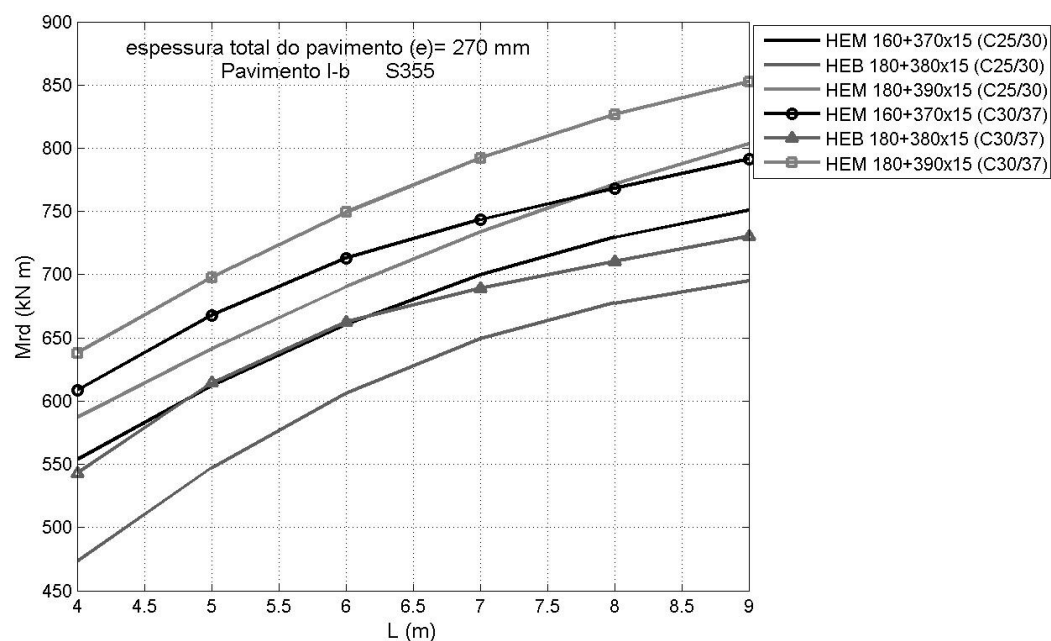


Figura 4.8: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante (e=270 mm), (perfis metálicos G2), Classe de betão C25/30 e C30/37.

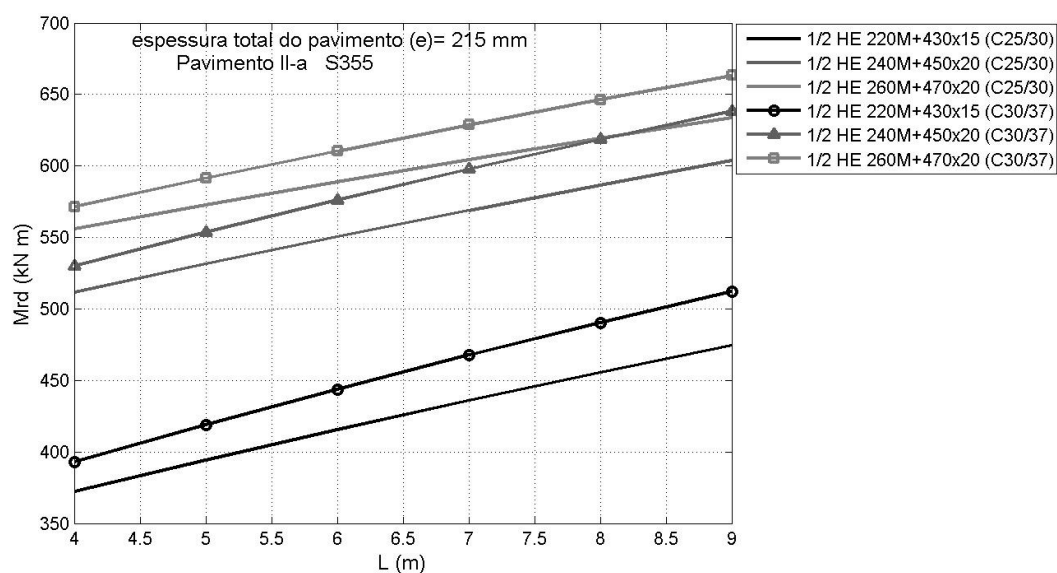


Figura 4.9: Resistência à flexão das secções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante (e=215 mm), (perfis metálicos G3), Classe de betão C25/30 e C30/37.

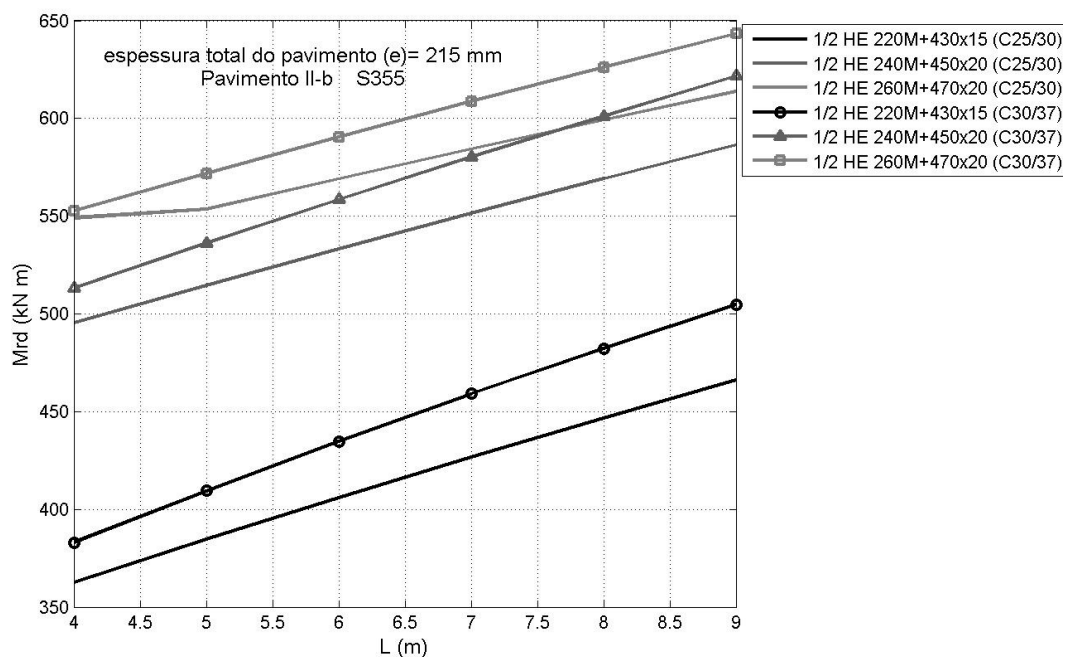


Figura 4.10: Resistência à flexão das seções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante ($e=215$ mm), (perfis metálicos G3), Classe de betão C25/30 e C30/37.

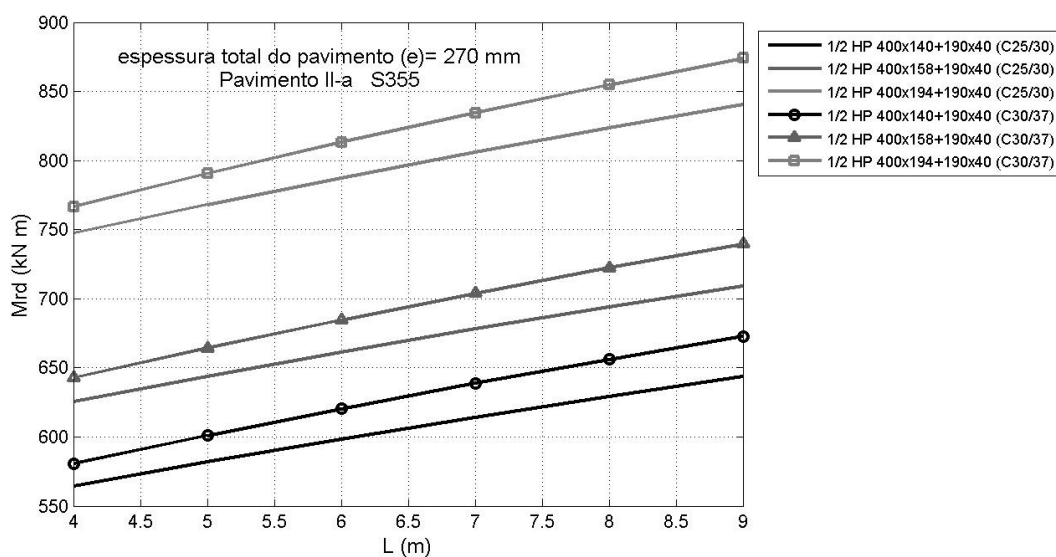


Figura 4.11: Resistência à flexão das seções mistas para os pavimentos tipo I-a, para a espessura total do pavimento constante ($e=270$ mm), (perfis metálicos G4), Classe de betão C25/30 e C30/37.

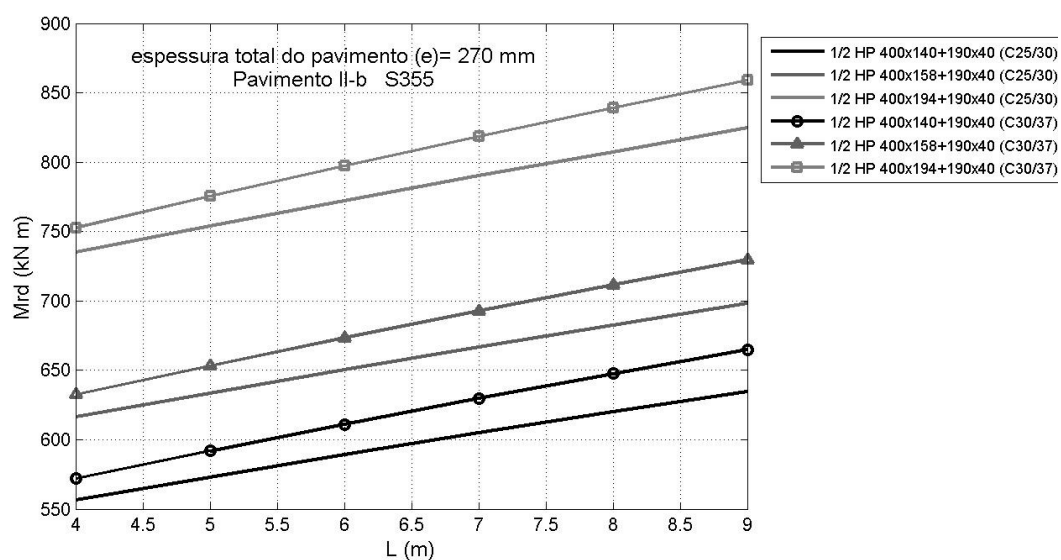


Figura 4.12: Resistência à flexão das seções mistas para os pavimentos tipo I-b, para a espessura total do pavimento constante (e=270 mm), (perfis metálicos G4), Classe de betão C25/30 e C30/37.

Capítulo 5

Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho abordou a verificação da segurança de vigas *slim floor*, que são elementos mistos não convencionais, com a característica de a viga metálica estar contida na espessura de betão e a laje descarregar no banzo inferior da viga metálica. No Capítulo 2 foi apresentado o desenvolvimento histórico destes sistemas, como também as vantagens da sua utilização. Actualmente, as vigas mais utilizadas são a ASB, SFB e a RH SFB, que demonstraram ser as mais eficientes quanto à colocação, fabricação e peso estrutural. Em alguns dos exemplos de aplicação apresentados, foi utilizada a viga em *T* invertida como situação excepcional, devido às especificidades dos projectos.

Neste tipo de sistemas, é possível a utilização de lajes pré fabricadas ou lajes mistas nervuradas. Ao longo dos tempos, surgiram vários sistemas comerciais, entre os quais o sistema *Slimdek* (viga ASB e laje mista), o sistema *Integrated floor beam* (viga IFB e laje pré-fabricada). A utilização da viga SFB implica uma conexão ao corte com conectores, enquanto que a viga ASB, devido às nervuras existentes no banzo superior tem a hipótese de realizar a conexão ao corte por aderência do material aço betão. Este tipo de pavimentos apresenta um conjunto de vantagens face aos sistemas convencionais que convergem na diminuição de custos finais, tempo de construção e estética (pavimentos planos e de espessura reduzida), aspectos importantes na construção de edifícios sustentáveis.

No Capítulo 3 é abordado o dimensionamento de vigas *slim floor*, para quatro tipo de pavimentos definidos (I-a, I-b, II-a e II-b). Na verificação da segurança da secção metálica (fase de construção), é possível utilizar o EC3 para efectuar o dimensionamento, no entanto, são apresentados alguns aspectos peculiares na verificação da segurança das secções metálicas *slim floor* segundo as publicações [23, 24, 25], que se baseiam na norma BS 5950:Parte 1 e Parte 3.1.

O EC4 não é explícito quanto ao dimensionamento deste tipo de vigas mistas. Estes sistemas não respeitam as condições de conexão ao corte definidas no EC4, como também a laje não é aplicada no banzo superior metálico, como é definido na mesma norma, mas sim nos banzos inferiores. Desta forma, optou-se unicamente por seguir as publicações referidas na verificação da segurança das vigas mistas *slim floor*. Desenvolveu-se um programa em MATLAB que permite o cálculo automático da verificação da segurança de vigas mistas *slim floor* em relação aos estados limites últimos e em serviço.

Os estudos efectuados no Capítulo 4 incidiram sobre a quantificação da variação do momento plástico resistente com o vão, para as vigas mistas *slim floor* definidas no Capítulo 3. Como primeiro caso de estudo (Caso 1.1), investigou-se a variação do momento plástico resistente entre uma secção mista definida pelo pavimento tipo I-a com outra definida pelo pavimento I-b, tendo as mesmas condições geométricas e resistência dos materiais. Foi possível também realizar o mesmo estudo com os pavimentos II-a e II-b (Caso 1.2). Num segundo caso de estudo (Caso 2), efectuou-se a comparação do momento plástico resistente entre uma secção mista com uma classe de betão C25/30 e outra com C30/37, para o mesmo tipo de pavimento, condições geométricas e resistência do aço. Os resultados foram obtidos através do programa desenvolvido em MATLAB. Desta forma, os estudos efectuados neste trabalho permitem retirar as conclusões que se apresentam sumarizadas neste capítulo.

Os estudos realizados permitiram verificar que uma secção mista do tipo I-a é mais resistente à flexão que uma secção mista do tipo I-b. O mesmo se pode concluir para as secções do tipo II-a e II-b. Isto deve-se ao facto de as secções do tipo II-a e I-a contabilizarem a resistência à flexão da laje maciça, caso a linha neutra plástica esteja abaixo da mesma. No caso da secção do tipo I-b e II-b, apenas contabilizam a resistência à flexão do betão acima da chapa nervurada da laje mista. A diferença da resistência à flexão entre uma secção do tipo I-a e do I-b, e entre uma secção do tipo II-a e II-b, pode ser mais ou menos significativa, dependendo da definição geométrica da secção mista e da resistência dos materiais utilizados.

A diferença verificada entre uma secção do tipo I-a e I-b, não é superior a 23.9 % e 3.9 %, para vãos de 4 e 9m, respectivamente, chegando a tomar valores muito inferiores aos indicados. No caso das secções II-a e II-b, a diferença verificada não ultrapassa os 4%.

Conclui-se também que, para o mesmo tipo de secção mista, com a mesma definição geométrica, ao se aumentar a classe de resistência do betão, a resistência à flexão da secção mista aumenta. Para as secções do tipo I-a, a diferença verificada entre uma secção com uma classe de betão C30/37 e C25/30,

não é superior a 11.1 % e 6.5 %, para vãos de 4 e 9m, respectivamente, chegando a tomar valores muito inferiores aos indicados. Para as secções do tipo I-b, a diferença verificada não ultrapassa os 14.7 % e 6.1 %, para o vão de 4 m e 9 m, respectivamente, podendo ser inferior. No caso da secções do tipo II-a II-b a diferença obtida não é superior a 6 % e 8 %, para o vão de 4 e 9 m, respectivamente.

Os pavimentos do tipo I-b e II-b, apesar apresentarem uma menor resistência à flexão, têm menos peso estrutural em comparação com os pavimentos do tipo I-a e II-b, respectivamente, o que pode ser vantajoso. Por outro lado, é possível aumentar a classe de betão dos pavimentos do tipo I-b e II-b de modo a aproximarem-se dos valores de resistência obtidos para os pavimentos I-a e II-a, com uma classe de betão inferior.

5.2 Desenvolvidos futuros

Neste tipo de pavimento é importante o comportamento em serviço. Desta forma, seria proveitoso conduzir um estudo paramétrico quanto à sensibilidade às deformações e acções dinâmicas. Para isso pode ser utilizado o programa desenvolvido, para determinadas secções mistas e uma carga constante, procurando representar de que forma a variação da secção e o vão influenciam o comportamento em serviço do sistema.

É importante, o estudo mais aprofundado quanto à conexão ao corte da secção mista por aderência, no caso de aplicação de vigas do tipo IFB ou ASB com laje maciça ou pré-fabricadas. A autora não encontrou registos de estudos efectuados neste tipo de pavimentos. Proceder a ensaios laboratoriais para verificar essa possibilidade, caso seja necessário

Neste trabalho, os estudos efectuados basearam-se na definição de conexão total ao corte. A utilização da conexão parcial ao corte diminui o momento plástico resistente. É importante a definição do comportamento da diminuição da resistência à flexão da secção mista e de que forma influencia no comportamento em serviço.

Proceder ao estudo mais aprofundado da aplicação do EC4 para os sistemas *slim floor*, ou reformulação da norma em causa para estabelecer a abordagem deste tipo de sistemas.

Efectuar o estudo de vigas mistas *slim floor* , contínuas e semi-contínuas, quanto à resistência à flexão e ao comportamento em serviço.

Bibliografia

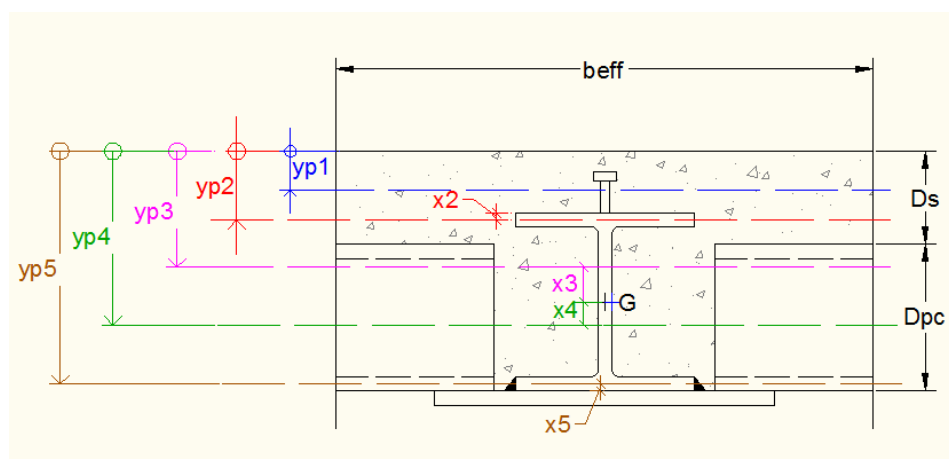
- [1] *Structural Steelwork Eurocodes: Development of a Trans-national Approach*. SSEDTA, 2001.
- [2] *Case Studies on Slimdek*. Relatório Técnico P309, The Steel Construction Institute, 2002.
- [3] *Web openings in composite beams*. STEEL INDUSTRY GUIDANCE NOTES, Julho 2009. SN37.
- [4] www.constructalia.com, Março 2011.
- [5] www.arcelormittal.com, Março 2011.
- [6] *Deltabeam*. www.peikko.com, Fevereiro 2011.
- [7] *Lecture 10.4.1: Continuous Beams I*. www.fgg.uni-lj.si, julho 2011.
- [8] *Slim Floor an inovative concept for floors*. www.arcelormittal.com, Fevereiro 2011.
- [9] Bailey, C. G.: *The behaviour of assymetric slim floor steel beams in fire*. Journal of Constructional Steel Research, 50:235–257, 1999.
- [10] BSI, Reino Unidp: *BS 5950-1, Structural use of steelwork in building. Part 1:Code of practice for design-Rolled and welded sections*, 2001.
- [11] BSI, Reino Unido: *BS 5950-3.1, Design in Composite Construction. Part 3.1:Code of practice for design of simple an continuous composite beams*, 2001.
- [12] CEN, Bruxelas, Bélgica: *EN 1994-1-1, Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1:General rules and rules for buildings*, 2004.
- [13] CEN, Bruxelas, Bélgica: *NPEN 1993-1-1, Eurocódigo 3. Projecto de estruturas de aço. Part 1-1:Regras gerais e regras para edifícios*, 2010.
- [14] Davis, J. M., D. Horton e R. E. Yeadon: *Arched Metal Decks*. In *NSCC 2001 Proceedings*, 2001.
- [15] Ellobody, Ehab: *Nonlinear behaviour of unprotected composite slim floor beams exposed to different fire conditions*. Journal of Constructional Steel Research, 49(6):762–771, 2011.

- [16] Huber, Gerald: *Semi-continuous beam-to-column joints at the Millennium Tower in Vienna, Austria*. Steel and Composite Structures, 1(2):159–170, 2001.
- [17] J. Santos, L. Calado e: *Estruturas Mistas de Aço e Betão*. IST Press, 2010.
- [18] Jurado, Manuel Galvez: *Estudio del comportamiento estructural de los forjados tipo "slim floor" bajo cargas de servicio*. Tese de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [19] Lars, W.: *Technical and Economic Advantages of Steel Construction, Building Costs and Overall Economy*. European Convention for Constructional Steelwork, 1978.
- [20] Lawson, R. M., H. Bode e T. Dauwel: *Developments of Slimdek Construction*. In *NSCC 2001 Proceedings*, 2001.
- [21] M., Bussell: *Appraisal of Existing Iron and Steel Structures*. Relatório Técnico P138, The Steel Construction Institute, 1997.
- [22] Makelainen, P. e Z. Ma: *Fire Resistance of Composite Slim Floor Beams*. Journal of Constructional Steel Research, 54(3):345–363, 1999.
- [23] Mullet, D. L.: *Slim Floor Design and Construction*. Relatório Técnico P110, The Steel Construction Institute, 1992.
- [24] Mullet, D. L., R. M. Lawson e J. W. Rackham: *Design of Asymmetric Slimflor Beams using Deep Composite Decking*. Relatório Técnico P175, The Steel Construction Institute, 1997.
- [25] Mullet, D.L. e R.M.Lawson: *Design of Slimflor Fabricated Beams using Deep Composite Decking*. Relatório Técnico P248, The Steel Construction Institute, 1999.
- [26] Wang, Y., L. Yang, Y. Shi e R. Zhang: *Loading capacity of composite slim frame beams*. Journal of Constructional Steel Research, 65(3):650–661, 2008.
- [27] www.tatasteelconstruction.com: *Slimdek Manual*, 2010.
- [28] Wyatt, T.A.: *Design guide on the vibrations of floors*. Relatório Técnico P076, The Steel Construction Institute, 1989.

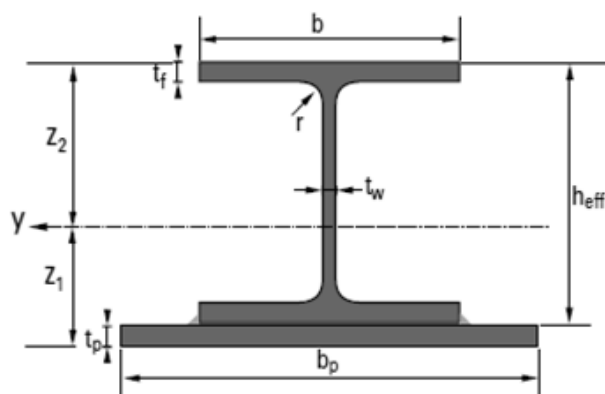
Apêndice A

Expressões de y_p e $M_{pl,Rd}$

A.1 Pavimento I-a



(a) Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5.



(b) denominação das dimensões da secção transversal da viga SFB

Figura A.1: Posições possíveis para a linha neutra plástica e definição da secção metálica SFB

A.1.1 Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

Posição da linha neutra plástica:

$$y_p^+ = \frac{A_a p_y}{b_{eff} 0.45 f_{cu}}, \quad (A.1)$$

$$y_p^- = \frac{A_a p_y - A_s f_{yd} + 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_{pc})}{b_{eff} 0.45 f_{cu}}. \quad (A.2)$$

Momento plástico resistente:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} \frac{(y_p^+)^2}{2} b_{eff} + p_y (t_f b (D_s + D_{pc} - h_{eff} - y_p^+ + \frac{t_f}{2}) \\ & + (h_{eff} - 2t_f) t_w (D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2} - y_p^+) + t_f b (D_s + D_{pc} - \frac{t_f}{2} - y_p^+) \\ & + t_p b_p (D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p^+)) \end{aligned} \quad (A.3)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação A.3 e A.2 substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão por

$$\frac{0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_{pc} - y_p^-)^2}{2} \quad (A.4)$$

e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida por

$$A_s f_{yd} (y_p^- - rec - \frac{\phi}{2}). \quad (A.5)$$

A.1.2 Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{A_a p_y - 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_{pc} - h_{eff})}{2p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}, \quad (A.6)$$

$$x^- = \frac{A_a p_y + 0.45 f_{cu} b_{eff} h_{eff} - A_s f_{yd}}{2p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}, \quad (A.7)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} - h_{eff} + x(+/-). \quad (A.8)$$

Momento plástico resistente:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}\frac{y_p^2}{2}b_{eff} + p_y((y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff})^2)\frac{b}{2} + ((D_s + D_{pc} - h_{eff} + t_f - y_p)^2)\frac{b}{2} + (h_{eff} - 2t_f)t_w(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2} - y_p) + t_fb(D_s + D_{pc} - y_p - \frac{t_f}{2}) + t_pb_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p) \quad (A.9)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.9) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.1.3 Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da secção I\H

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2}) - p_yb_pt_p}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.10)$$

$$x^- = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}\frac{h_{eff}}{2} + p_yb_pt_p - A_sf_{yd}}{2p_yt_w - 0.45f_{cu}b_{eff}}, \quad (A.11)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2} - x(+/-). \quad (A.12)$$

Momento plástico resistente:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}\frac{y_p^2}{2}b_{eff} + p_y(t_fb(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) + \frac{t_w(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - t_f)^2}{2} + \frac{t_w(D_s + D_{pc} - t_f - y_p)^2}{2} + t_fb(D_s + D_{pc} - \frac{t_f}{2} - y_p) + t_pb_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.13)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.13) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.1.4 Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da secção I\H

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{p_yb_pt_p - 0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2})}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.14)$$

$$x^- = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}\frac{h_{eff}}{2} + p_y b_p t_p - A_s f_{yd}}{2p_y t_w + 0.45f_{cu}b_{eff}}, \quad (A.15)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff}}{2} + x(+/-). \quad (A.16)$$

As expressões do momento plástico resistente, positivo e negativo para o caso 4 são iguais às definidas para o caso 3 (Equação (A.13))

A.1.5 Caso 5-Linha neutra plástica no banzo inferior metálico

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{p_y(A - 2b_p t_p) + 0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc})}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_y b}, \quad (A.17)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} + p_y(A - 2b_p t_p)}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_y b}, \quad (A.18)$$

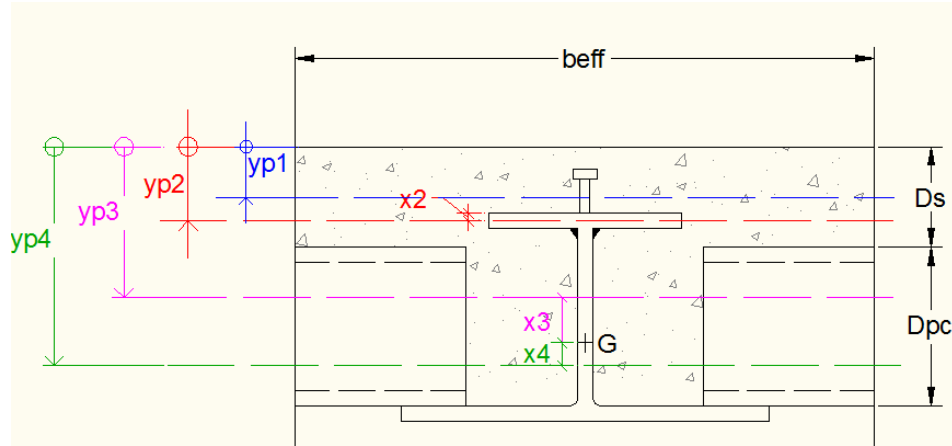
$$y_p = D_s + D_{pc} - x(+/-). \quad (A.19)$$

Momento plástico resistente:

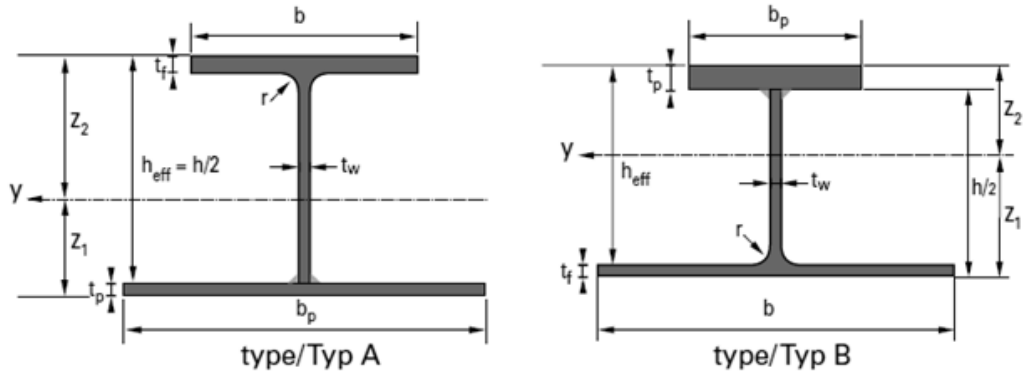
$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ &= 0.45f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y(t_f b(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) \\ &+ (h_{eff} - 2t_f)t_w(y_p - D_s - D_{pc} + \frac{h_{eff}}{2}) + b \frac{(y_p - D_s - D_{pc} + t_f)^2}{2} + b \frac{(D_s + D_{pc} - y_p)^2}{2} \\ &+ t_p b_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.20) \end{aligned}$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.20) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.2 Pavimento I-b



(a) Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3 e 4.



(b) Denominação das dimensões da secção transversal da viga IFB tipo A e B

Figura A.2: Posições possíveis da linha neutra plástica e definição da secção metálica IFB

A.2.1 Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

A expressão de cálculo para a posição da linha neutra plástica para o pavimento I-b caso 1 é igual à expressão definida para o pavimento I-a caso 1 (Equação (A.1) e (A.2)).

Se a viga IFB for do tipo A, a expressão do momento plástico resistente é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y(t_f b(D_s + D_{pc} - h_{eff} - y_p + \frac{t_f}{2}) + (h_{eff} - t_f)t_w(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff} - t_f}{2} - y_p) + t_p b_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.21)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.21) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, a expressão do momento plástico resistente é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y(t_p b_p(D_s + D_{pc} - h_{eff} - y_p + \frac{t_p}{2}) + (h_{eff} - t_p)t_w(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff} - t_p}{2} - y_p) + t_f b(D_s + D_{pc} + \frac{t_f}{2} - y_p)) \quad (A.22)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.22) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.2.2 Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a posição da linha neutra plástica no caso 2, são iguais às definidas para o pavimento I-a caso 2 (Equação (A.6), (A.5) e (A.8)).

Para o momento resistente plástico é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y(b \frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff})^2}{2} + b \frac{(D_s + D_{pc} - h_{eff} + t_f - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_f)t_w(D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff} - t_f}{2} - y_p) + t_p b_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.23)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.23) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B as expressões para a linha neutra plástica e para o momento resistente plástico são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y A_a - 0.45f_{cu} b_{eff}(D_s + D_{pc} - h_{eff})}{0.45f_{cu} b_{eff} + 2p_y b_p}, \quad (A.24)$$

$$x^- = \frac{A_a p_y + 0.45 f_{cu} b_{eff} h_{eff} - A_s f_{yd}}{2 p_y b_p + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.25)$$

A expressão de y_p é igual à utilizada para a viga SFB (Equação (A.8)).

O momento plástico resistente é dado por

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y (b_p \frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff})^2}{2} \\ & + b_p \frac{(D_s + D_{pc} - h_{eff} + t_p - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_p) t_w (D_s + D_{pc} - \frac{h_{eff} - t_p}{2} - y_p) \\ & + t_f b (D_s + D_{pc} + \frac{t_f}{2} - y_p)). \end{aligned} \quad (A.26)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.26) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.2.3 Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IFB

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a posição da linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes

$$x^+ = \frac{0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_{pc} + t_p - z_1) + p_y (b t_f - b_p t_p - t_w (2 z_1 - 2 t_p + t_f - h_{eff}))}{0.45 f_{cu} b_{eff} + 2 p_y t_w}, \quad (A.27)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} - 0.45 f_{cu} b_{eff} (z_1 - t_p) + p_y (b t_f - b_p t_p - t_w (2 z_1 - 2 t_p + t_f - h_{eff}))}{0.45 f_{cu} b_{eff} + 2 p_y t_w}, \quad (A.28)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} + t_p - z_1 - x(+/-). \quad (A.29)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y (b t_f (y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) \\ & + t_w \frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_{pc} - y_p)^2}{2} + t_p b_p (D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \end{aligned} \quad (A.30)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.30) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida

do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, as expressões são as seguintes:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc} + t_f - z_1) + p_y(b_pt_p - bt_f - t_w(2z_1 - 2t_f + t_p - h_{eff}))}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.31)$$

$$x^- = \frac{A_sf_{yd} - 0.45f_{cu}b_{eff}(z_1 - t_f) + p_y(b_pt_p - bt_f - t_w(2z_1 - 2t_f + t_p - h_{eff}))}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.32)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} + t_f - z_1 - x(+/-). \quad (A.33)$$

O momento plástico resistente é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}\frac{y_p^2}{2}b_{eff} + p_y(b_pt_p(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_p}{2}) + t_w\frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - t_p)^2}{2} + t_w\frac{(D_s + D_{pc} - y_p)^2}{2} + t_fb(D_s + D_{pc} + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.34)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.34) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.2.4 Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga IFB

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a posição da linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y(b_pt_p - t_w(h_{eff} + 2t_p - t_f - 2z_1) - bt_f) - 0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc} + t_p - z_1)}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.35)$$

$$x^- = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(z_1 - t_p) + p_y(b_pt_p - t_w(h_{eff} + 2t_p - t_f - 2z_1) - bt_f) - A_sf_{yd}}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.36)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} + t_p - z_1 + x(+/-). \quad (A.37)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}\frac{y_p^2}{2}b_{eff} + p_y(bt_f(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) + t_w\frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w\frac{(D_s + D_{pc} - y_p)^2}{2} + t_pb_p(D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.38)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.38) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, as expressões são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y(bt_f - t_w(h_{eff} + 2t_p - t_f - 2z_1) - b_pt_p) - 0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_{pc} + t_f - z_1)}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.39)$$

$$x^- = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(z_1 - t_p) + p_y(b_pt_p - t_w(h_{eff} + 2t_p - t_f - 2z_1) - bt_f) - A_sf_{yd}}{0.45f_{cu}b_{eff} + 2p_yt_w}, \quad (A.40)$$

$$y_p = D_s + D_{pc} + t_f - z_1 + x(+/-). \quad (A.41)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}\frac{y_p^2}{2}b_{eff} + p_y(b_pt_p(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - \frac{t_p}{2}) + t_w\frac{(y_p - D_s - D_{pc} + h_{eff} - t_p)^2}{2} + t_w\frac{(D_s + D_{pc} - y_p)^2}{2} + t_fb(D_s + D_{pc} + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.42)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.42) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.4), e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.3 Pavimento II-a

A.3.1 Para $D_d = h_{eff}$, caso 1, 2, 3 e 4

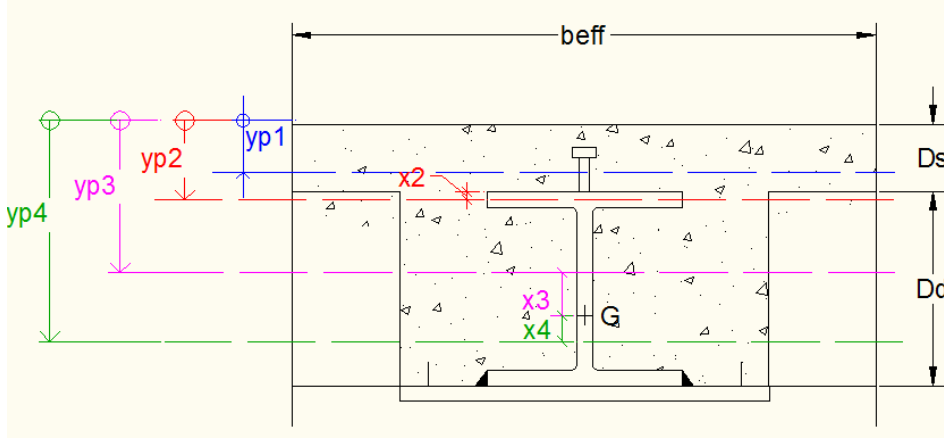


Figura A.3: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3 e 4.

Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

A expressão de cálculo da linha neutra plástica positiva para o pavimento II-a caso 1 é igual à expressão definida para o pavimento I-a caso 1 (Equação (A.1)). A linha neutra plástica negativa é dada por

$$y_p^- = \frac{A_a p_y - A_s f_{yd} + 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s)}{b_{eff} 0.45 f_{cu}}. \quad (A.43)$$

A expressão para o momento plástico resistente positivo é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45 f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y (t_f b (D_s + D_d - h_{eff} - y_p + \frac{t_f}{2}) + (h_{eff} - 2t_f) t_w (D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} - y_p) + t_f b (D_s + D_d - \frac{t_f}{2} - y_p) + t_p b_p (D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.44)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.44) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão por

$$\frac{0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s - y_p^-)^2}{2} \quad (A.45)$$

e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico para $D_d = h_{eff}$

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{A_a p_y - 0.45 f_{cu} b_{eff} D_s}{2 p_y b}, \quad (A.46)$$

$$x^- = \frac{A_a p_y - A_s f_{yd}}{2 p_y b}, \quad (A.47)$$

$$y_p = D_s + D_d - h_{eff} + x(+/-). \quad (A.48)$$

Momento plástico resistente positivo:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ &= 0.45 f_{cu} D_s b_{eff} \left(y_p - \frac{D_s}{2} \right) + p_y \left((y_p - D_s - D_d + h_{eff})^2 \right) \frac{b}{2} \\ &+ \left((D_s + D_d - h_{eff} + t_f - y_p)^2 \right) \frac{b}{2} + (h_{eff} - 2t_f) t_w \left(D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} - y_p \right) \\ &+ t_f b \left(D_s + D_d - y_p - \frac{t_f}{2} \right) + t_p b_p \left(D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p \right). \quad (A.49) \end{aligned}$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.49) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IH

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{0.45 f_{cu} b_{eff} D_s - p_y b_p t_p}{2 p_y t_w}, \quad (A.50)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} - p_y b_p t_p}{2 p_y t_w}, \quad (A.51)$$

$$y_p = D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} - x(+/-). \quad (A.52)$$

Momento plástico resistente positivo:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ &= 0.45 f_{cu} D_s b_{eff} \left(y_p - \frac{D_s}{2} \right) + p_y \left(t_f b \left(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_f}{2} \right) \right. \\ &+ t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p - t_f)^2}{2} + t_f b \left(D_s + D_d - \frac{t_f}{2} - y_p \right) \\ &\left. + t_p b_p \left(D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p \right) \right). \quad (A.53) \end{aligned}$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.53) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga I/H

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{p_y b_p t_p - 0.45 f_{cu} b_{eff} D_s}{2 p_y t_w}, \quad (A.54)$$

$$x^- = \frac{p_y b_p t_p - A_s f_{yd}}{2 p_y t_w}, \quad (A.55)$$

$$y_p = D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} + x(+/-). \quad (A.56)$$

As expressões de cálculo utilizadas para o momento plástico resistente para o pavimento II-a caso 4 são iguais às definidas para o caso 3 (Equação (A.53) e (A.5)).

A.3.2 Para $D_d = h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4

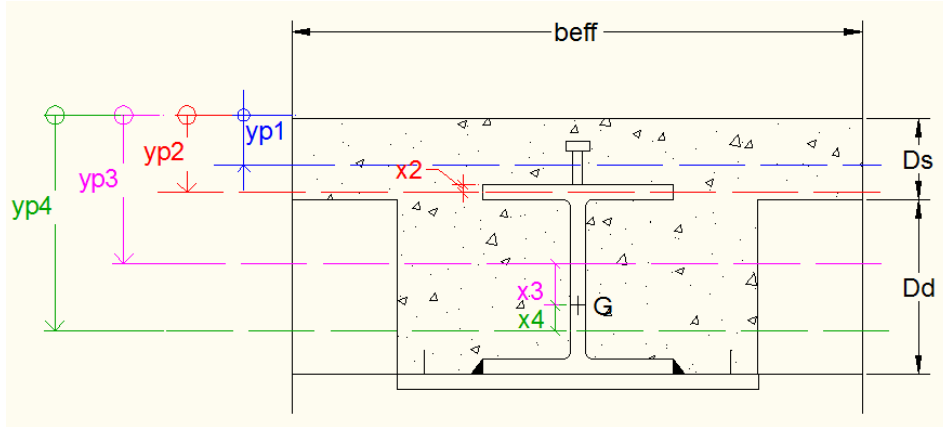


Figura A.4: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3 e 4.

Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

As expressões de cálculo do caso 1 para $D_d = h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para o caso 1 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.1), (A.44), (A.43), (A.45) e (A.5)).

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{A_a p_y - 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_d - h_{eff})}{2 p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.57)$$

As expressões de cálculo para y_p e para $M_{pl,RD}$ do caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$, são iguais às definidas para o caso 2 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.48) e (A.49)). Considerou-se que para o cálculo do momento plástico negativo a espessura de betão à compressão é muito reduzida, de modo a não provocar alterações significativas nos resultados dados pela expressão (A.49).

Caso 3 e 4-Linha neutra plástica na alma acima e abaixo do centro de gravidade da viga IH, respectivamente

As expressões de cálculo dos casos 3 e 4 para $D_d = h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para o caso 3 e 4 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.50), (A.51), (A.52), (A.53), (A.54), (A.55) e (A.56)).

A.3.3 Para $D_d < h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4 e 5

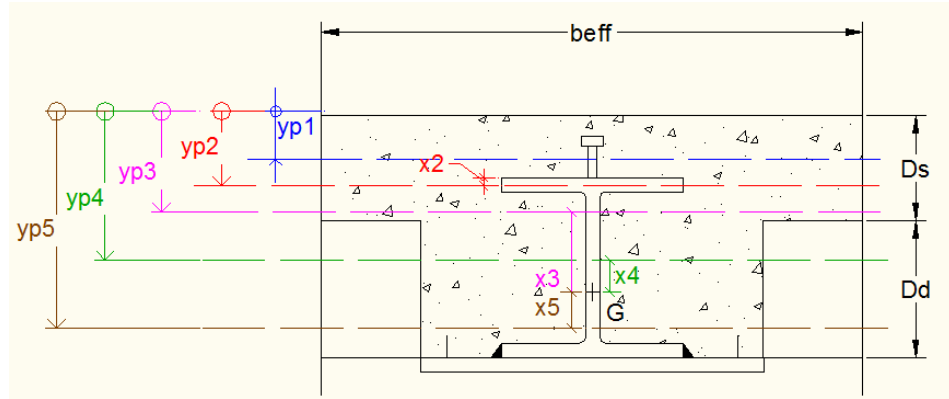


Figura A.5: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5.

As expressões de cálculo do caso 1 para $D_d < h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para o caso 1 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.1), (A.44), (A.43), (A.45) e (A.5)).

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{A_a p_y - 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_d - h_{eff})}{2 p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}, \quad (A.58)$$

$$x^- = \frac{A_a p_y + 0.45 f_{cu} b_{eff} (h_{eff} - D_d) - A_s f_{yd}}{2 p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.59)$$

As expressões de cálculo para y_p e para $M_{pl,RD}^+$ do caso 2 para $D_d < h_{eff} - t_f$, são iguais às definidas para o caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$ (Equação (A.48) e (A.49)).

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.49) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga I\H, zona sólida da laje

Posição da linha neutra plástica:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2}) - p_y b_p t_p}{2p_y t_w + 0.45f_{cu}b_{eff}}, \quad (A.60)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} - 0.45f_{cu}b_{eff}(\frac{h_{eff}}{2} - D_d) - p_y b_p t_p}{2p_y t_w + 0.45f_{cu}b_{eff}} \quad (A.61)$$

A expressão de cálculo de y_p , caso 3 para $D_d < h_{eff} - t_f$, é igual à definida para o caso 3 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.52)).

Momento plástico resistente positivo:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45f_{cu}b_{eff}\frac{y_p^2}{2} + p_y(t_f b(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) \\ & + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p - t_f)^2}{2} + t_f b(D_s + D_d - \frac{t_f}{2} - y_p) \\ & + t_p b_p(D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \end{aligned} \quad (A.62)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.62) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 4-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga I\H, zona vazada da laje

A expressão de cálculo de y_p e $M_{pl,Rd}$, caso 4 para $D_d < h_{eff} - t_f$, é igual à definida para o caso 3 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.52) e (A.53)).

Caso 5-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga I\H

A expressão de cálculo de y_p e $M_{pl,Rd}$, caso 4 para $D_d < h_{eff} - t_f$, é igual à definida para o caso 4 para $D_d = h_{eff}$ (Equação eqA.56 e (A.53)).

A.4 Pavimento II-b (Ligação ao corte com conectores)

A.4.1 Para $D_d = h_{eff}$ caso 1, 2, 3, 4

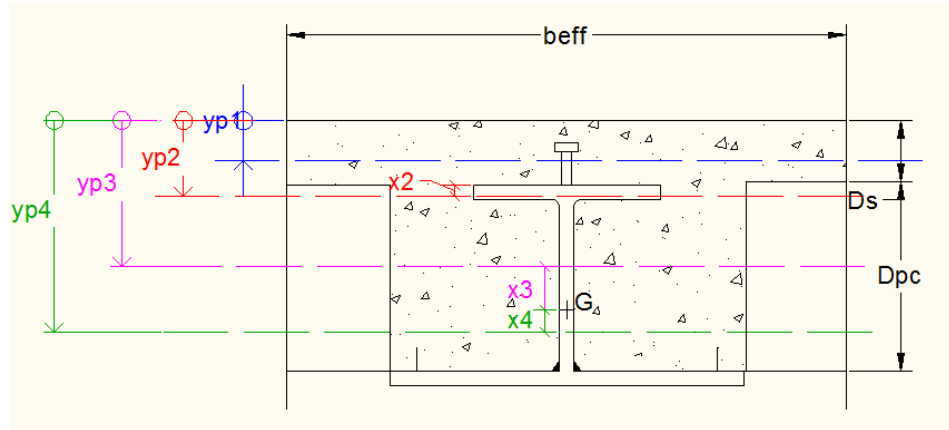


Figura A.6: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4.

Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

A expressão da linha neutra plástica positiva (y_p^+) do caso 1 para $D_d = h_{eff}$ é igual à definida para o pavimento I-a, caso 1 (Equação (A.1)). A expressão da linha neutra plástica positiva (y_p^-) do caso 1 para $D_d = h_{eff}$ é igual à definida para o pavimento II-a, caso 1 (Equação (A.43)).

Se a viga IFB for do tipo A, a expressão do momento plástico resistente positivo é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45 f_{cu} b_{eff} \frac{y_p^2}{2} + p_y (b t_f (D_s + D_d - h_{eff} - y_p + \frac{t_f}{2}) + (h_{eff} - t_f) t_w (D_s + D_d - \frac{h_{eff} - t_f}{2} - y_p) + t_p b_p (D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.63)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.63) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, a expressão do momento plástico resistente positivo é a seguinte:

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}b_{eff}\frac{y_p^2}{2} + p_y(b_pt_p(D_s + D_d - h_{eff} - y_p + \frac{t_p}{2}) + (h_{eff} - t_p)t_w(D_s + D_d - \frac{h_{eff} - t_p}{2} - y_p) + t_fb(D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.64)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.64) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{A_ap_y - 0.45f_{cu}b_{eff}D_s}{2p_yb}. \quad (A.65)$$

A expressão de x^- para o caso 2, pavimento II-b é igual à definida para o pavimento II-a, caso 2 (equação (A.47)). A expressão de y_p é dada por

$$y_p = D_s + D_d - h_{eff} + x(+/-). \quad (A.66)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}D_s(y_p - \frac{D_s}{2})b_{eff} + p_y(b\frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff})^2}{2} + b\frac{(D_s + D_d - h_{eff} + t_f - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_f)t_w(D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} - y_p) + t_pb_p(D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.67)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.67) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B as expressões para a linha neutra plástica e para o momento resistente plástico são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_yA_a - 0.45f_{cu}b_{eff}D_s}{2p_yb_p}, \quad (A.68)$$

$$x^- = \frac{p_yA_a - A_sf_{yd}}{2p_yb_p}. \quad (A.69)$$

A expressão de y_p é igual à utilizada para a viga IFB de tipo A (Equação (A.65)). O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}D_s(y_p - \frac{D_s}{2})b_{eff} + p_y(b_p \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff})^2}{2} + b_p \frac{(D_s + D_d - h_{eff} + t_p - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_p)t_w(D_s + D_d - \frac{h_{eff} - t_p}{2} - y_p) + t_fb(D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.70)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.70) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IFB

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a posição da linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}D_s + p_y(bt_f - b_pt_p - t_w(2z_1 + t_f - 2t_p - h_{eff}))}{2p_yt_w}, \quad (A.71)$$

$$x^- = \frac{A_sf_{yd} + p_y(bt_f - b_pt_p - t_w(2z_1 + t_f - 2t_p - h_{eff}))}{2p_yt_w}, \quad (A.72)$$

$$y_p = D_s + D_d + t_p - z_1 - x(+/-). \quad (A.73)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}D_s(y_p - \frac{D_s}{2})b_{eff} + p_y(bt_f(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_pb_p(D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.74)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.74) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, as expressões são as seguintes:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}D_s + p_y(b_pt_p - bt_f - t_w(2z_1 + t_p - 2t_f - h_{eff}))}{2p_yt_w}, \quad (A.75)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} + p_y (b_p t_p - b_f t_f - t_w (2z_1 + t_p - 2t_f - h_{eff}))}{2p_y t_w} \quad (A.76)$$

A expressão de y_p é igual à utilizada para a viga IFB de tipo A (Equação eqA.73).

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45 f_{cu} D_s b_{eff} (y_p - \frac{D_s}{2}) + p_y (b_p t_p (y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_p}{2}) + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_p)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_f b (D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.77)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.77) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga IFB

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a posição da linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y (b_p t_p - b_f t_f - t_w (2t_p + h_{eff} - 2z_1 - t_f)) - 0.45 f_{cu} b_{eff} D_s}{2p_y t_w}, \quad (A.78)$$

$$x^- = \frac{p_y (b_p t_p - b_f t_f - t_w (2t_p + h_{eff} - 2z_1 - t_f)) - A_s f_{yd}}{2p_y t_w}, \quad (A.79)$$

$$y_p = D_s + D_d + t_p - z_1 + x(+/-). \quad (A.80)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45 f_{cu} D_s b_{eff} (y_p - \frac{D_s}{2}) + p_y (b_f t_f (y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_p b_p (D_s + D_{pc} + \frac{t_p}{2} - y_p)). \quad (A.81)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.81) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, as expressões são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y(bt_f - b_p t_p - t_w(2t_f + h_{eff} - 2z_1 - t_p)) - 0.45f_{cu}b_{eff}D_s}{2p_y t_w}, \quad (A.82)$$

$$x^- = \frac{p_y(bt_f - b_p t_p - t_w(2t_f + h_{eff} - 2z_1 - t_p)) - A_s f_{yd}}{2p_y t_w}, \quad (A.83)$$

$$y_p = D_s + D_d + t_f - z_1 + x(+/-). \quad (A.84)$$

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}D_s b_{eff}(y_p - \frac{D_s}{2}) + p_y(b_p t_p(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_p}{2}) + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_p)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_f b(D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.85)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.85) retirando o momento plástico resistente da zona comprimida do betão e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

A.4.2 Para $D_d = h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4

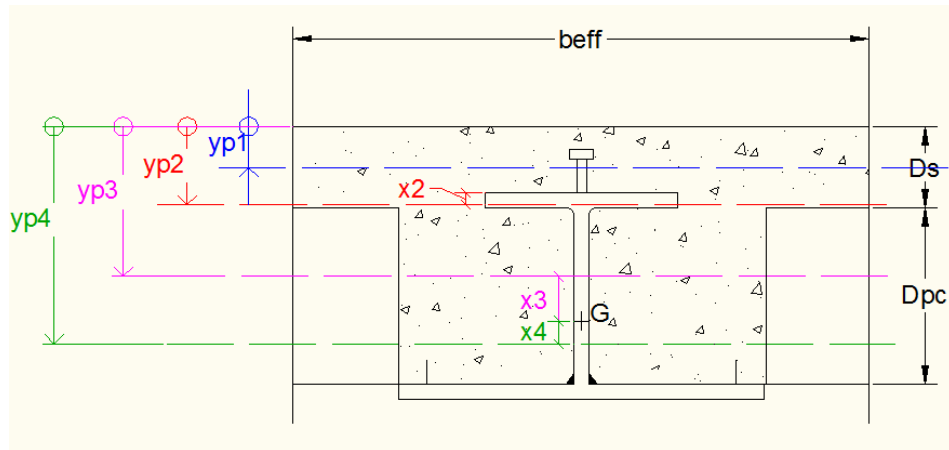


Figura A.7: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4.

Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

As expressões da linha neutra plástica do caso 1 para $D_d = h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para $D_d = h_{eff}$, caso 1.

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões para a linha neutra plástica e para o momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{A_a p_y - 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_d - h_{eff})}{2 p_y b + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.86)$$

A expressão da linha neutra plástica (x^-) do caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$ é igual à definida para o caso 2 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.47)).

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y \left(b \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff})^2}{2} \right. \\ & + b \frac{(D_s + D_d - h_{eff} + t_f - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_f) t_w (D_s + D_d - \frac{h_{eff}}{2} - y_p) \\ & \left. + t_p b_p (D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p) \right). \quad (A.87) \end{aligned}$$

A expressão para $M_{pl,RD}^-$ do caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$ é igual à definida para o caso 2 para $D_d = h_{eff}$ ((A.67)). Considerou-se que para o cálculo do momento plástico negativo, a espessura de betão à compressão é muito reduzida de modo a não provocar alterações significativas nos resultados dados pela expressão (A.67).

Se a viga IFB for do tipo B as expressões para a linha neutra plástica e para o momento resistente plástico são as seguintes:

$$x^+ = \frac{p_y A_a - 0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_d - h_{eff})}{2 p_y b_p + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.88)$$

A expressão da linha neutra plástica (x^-) do caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$ é igual à definida para o caso 2 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.69)). A expressão de y_p é igual à utilizada para a viga IFB de tipo A (Equação (A.66)).

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} \frac{y_p^2}{2} b_{eff} + p_y \left(b_p \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff})^2}{2} \right. \\ & + b_p \frac{(D_s + D_d - h_{eff} + t_p - y_p)^2}{2} + (h_{eff} - t_p) t_w (D_s + D_d - \frac{h_{eff} - t_p}{2} - y_p) \\ & \left. + t_f b (D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p) \right). \quad (A.89) \end{aligned}$$

A expressão para $M_{pl,RD}^-$ do caso 2 para $D_d = h_{eff} - t_f$ é igual à definida para o caso 2 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.70)). Considerou-se que para o cálculo do momento plástico negativo, a espessura de betão à compressão é muito

reduzida de modo a não provocar alterações significativas nos resultados dados pela expressão (A.67).

Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga metálica IFB

As expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente do caso 3, para $D_d = h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para o caso 3 para $D_d = h_{eff}$ (Equações (A.71), (A.73), (A.74) e (A.75)).

Caso 4-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga metálica IFB

As expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente do caso 4, para $D_d = h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para o caso 4 para $D_d = h_{eff}$ (Equações (A.78), (A.80), (A.81), (A.82), (A.84) e (A.85)).

A.4.3 Para $D_d < h_{eff} - t_f$ caso 1, 2, 3, 4 e 5

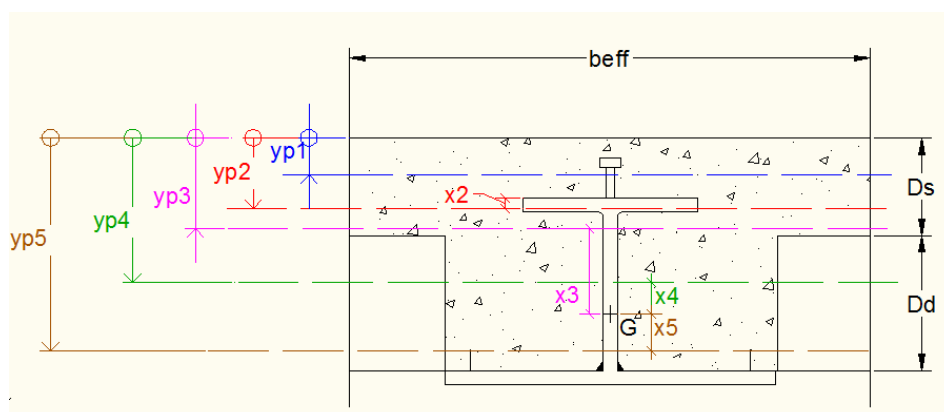


Figura A.8: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5.

Caso 1-Linha neutra plástica no banzo de betão

As expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente do caso 1 para $D_d < h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para $D_d = h_{eff}$, caso 1.

Caso 2-Linha neutra plástica no banzo superior metálico

As expressões da linha neutra plástica positiva (y_p^+) e do momento plástico resistente positivo ($M_{pl,Rd}^+$) do caso 2 para $D_d < h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para $D_d = h_{eff} - t_f$, caso 2 (Equações (A.86), (A.80), (A.87), (A.88) e (A.89)).

Se a viga IFB for do tipo A, a expressão para a linha neutra plástica negativa (y_p^-) é igual à definida para o pavimento tipo II-a para $D_d < h_{eff} - t_f$, caso 2 (equação (A.59)). O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$), obtém-se utilizando a equação (A.87) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B a expressão da linha neutra plástica negativa é dada por:

$$x^- = \frac{A_a p_y + 0.45 f_{cu} b_{eff} (h_{eff} - D_d) - A_s f_{yd}}{2 p_y t_w + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.90)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.89) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 3-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IFB, zona sólida da laje

Se a viga IFB for do tipo A, as expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{0.45 f_{cu} b_{eff} (D_s + D_d - z_1) + p_y (b t_f - b_p t_p - t_w (2 z_1 - 2 t_p + t_f - h_{eff}))}{2 p_y t_w + 0.45 f_{cu} b_{eff}}, \quad (A.91)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} - 0.45 f_{cu} b_{eff} (z_1 - D_d + t_p) + p_y (b t_f - b_p t_p - t_w (2 z_1 - 2 t_p + t_f - h_{eff}))}{2 p_y t_w + 0.45 f_{cu} b_{eff}}. \quad (A.92)$$

A expressão de cálculo de y_p , caso 3 para $D_d < h_{eff} - t_f$, é igual à definida para o caso 3 para $D_d = h_{eff}$ (Equação (A.52)).

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ = & 0.45 f_{cu} b_{eff} \frac{y_p^2}{2} + p_y (t_f b (y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_f}{2}) \\ & + t_w \frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} \\ & + t_p b_p (D_s + D_d + \frac{t_p}{2} - y_p)). \end{aligned} \quad (A.93)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.93) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço

para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Se a viga IFB for do tipo B, as expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente são as seguintes:

$$x^+ = \frac{0.45f_{cu}b_{eff}(D_s + D_d - z_1) + p_y(b_pt_p - bt_f - t_w(2z_1 - 2t_f + t_f - h_{eff}))}{2p_yt_w + 0.45f_{cu}b_{eff}}, \quad (A.94)$$

$$x^- = \frac{A_s f_{yd} - 0.45f_{cu}b_{eff}(z_1 - D_d + t_f) + p_y(b_pt_p - bt_f - t_w(2z_1 - 2t_f + t_f - h_{eff}))}{2p_yt_w + 0.45f_{cu}b_{eff}}. \quad (A.95)$$

A expressão de cálculo de y_p , para a viga IFB de tipo B é igual à definida para a viga IFB tipo B (Equação (A.52)).

O momento plástico resistente positivo é dado por

$$M_{pl,Rd}^+ = 0.45f_{cu}b_{eff}\frac{y_p^2}{2} + p_y(t_pb_p(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_p}{2}) + t_w\frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - t_p)^2}{2} + t_w\frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_fb(D_s + D_d + \frac{t_f}{2} - y_p)). \quad (A.96)$$

O momento plástico resistente negativo ($M_{pl,Rd}^-$) obtém-se utilizando a equação (A.96) substituindo o momento plástico resistente da zona comprimida do betão pela expressão (A.45) e acrescentando a contribuição dos varões de aço para o momento plástico resistente, definida pela expressão (A.5).

Caso 4-Linha neutra plástica na alma acima do centro de gravidade da viga IFB, zona vazada da laje

As expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente do caso 4 para $D_d < h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para $D_d = h_{eff}$ caso 3 (Equações (A.71), (A.73), (A.74) e (A.75)).

Caso 5-Linha neutra plástica na alma abaixo do centro de gravidade da viga IFB, zona vazada da laje

As expressões da linha neutra plástica e do momento plástico resistente do caso 5 para $D_d < h_{eff} - t_f$ são iguais às definidas para $D_d = h_{eff}$, caso 4 (Equações (A.78), (A.80), (A.81), (A.82), (A.84) e (A.85)).

A.5 Pavimento II-b (Ligação ao corte contínua)

No cálculo do momento plástico resistente e da posição da linha neutra plástica basta utilizar as expressões definidas para o pavimento II-b (ligação ao corte com conectores), considerando que a ligação total ao corte é verificada.

Apêndice B

Expressões para y_e e I_c

Para o cálculo da linha neutra elástica (y_e) e do momento de inércia da secção mista (I_c) é necessário homogeneizar a secção. Para tal é utilizado o coeficiente de homogeneização (α_e) determinado pela relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do betão. O coeficiente α_e toma valores entre 6 a 7 para um betão de peso normal a curto prazo. O coeficiente de homogeneização para cargas aplicadas a longo prazo depende da fluência do betão, alterando o módulo de elasticidade do betão. Desta forma, α_e pode tomar valores entre 18 a 21 para um betão de peso normal. A publicação [23] define que, para edifícios de uso normal, o coeficiente de homogeneização deve ser considerado $2/3$ do coeficiente a curto prazo e $1/3$ do coeficiente a longo prazo, tomando valores entre 10 a 15 para um betão normal

B.1 Pavimento I-a e II-a

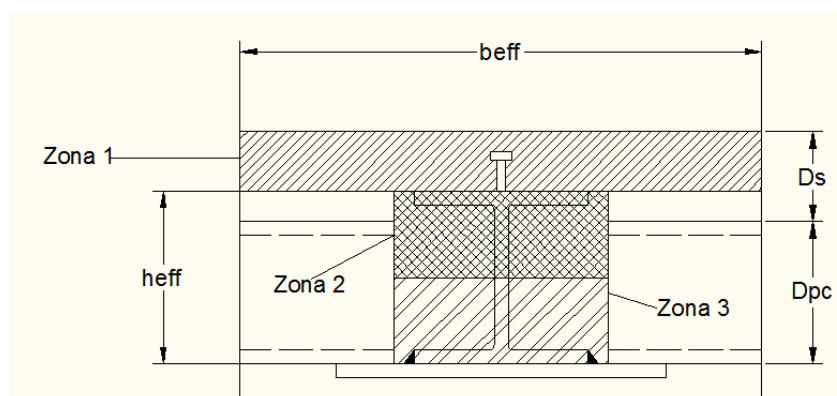


Figura B.1: Zonas de posição para a linha neutra, pavimento I-a [23].

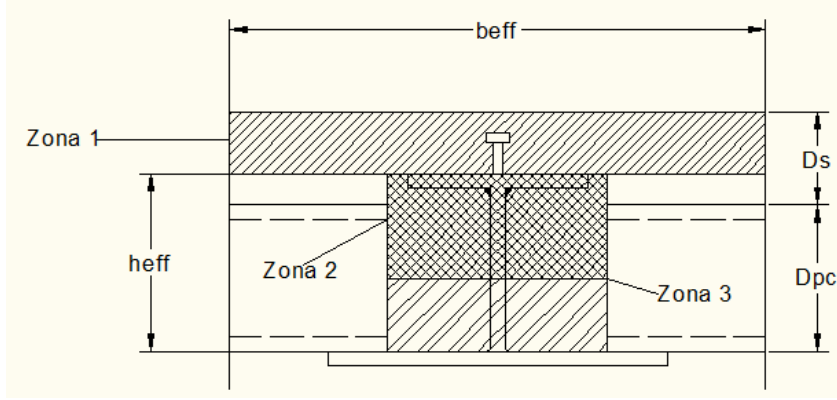


Figura B.2: Zonas de posição para a linha neutra, pavimento tipo II-a [23].

B.1.1 Zona 1

Como se considera uma viga simplesmente apoiada, as propriedades definidas consideram a não fendilhação do betão. A posição da linha neutra elástica da secção mista para a zona 1 é dada por

$$y_e = \frac{\frac{b_{eff}(D_s + D_{pc} - h_{eff})^2}{2\alpha_e} + A_a(D_s + D_{pc} - z_1)}{A_a + \frac{(D_s + D_{pc} - h_{eff})b_{eff}}{10}}. \quad (B.1)$$

O momento de inércia (I_c) é determinado através de (pavimento I-a e II-a, viga IFB tipo A)

$$I_c = \frac{b_{eff}y_e^2}{I} 3\alpha_e + I_y + A_a(D_s + D_{pc} + t_p - z - 1 - y_e)^2. \quad (B.2)$$

Para o pavimento tipo II-a, IFB tipo B tem-se

$$I_c = \frac{b_{eff}y_e^2}{I} 3\alpha_e + I_y + A_a(D_s + D_{pc} + t_f - z - 1 - y_e)^2. \quad (B.3)$$

B.1.2 Zona 2

Para a linha neutra plástica posicionada na zona 2, tem-se a seguinte expressão

$$y_e = \frac{\frac{b_{eff}(D_s + D_{pc} - h_{eff})^2}{2\alpha_e} + A_a(D_s + D_{pc} - z_1)}{A_a + \frac{(D_s + D_{pc} - h_{eff})b_{eff}}{10}}. \quad (B.4)$$

O momento de inércia (I_c) é determinado através de (pavimento I-a e II-a, viga IFB

tipo A)

$$I_c = b_{eff} (D_{pc} + D_s - h_{eff}) \left(\frac{(D_{pc} + D_s - h_{eff})^2}{12} + \frac{\left(y_e - \frac{D_s + D_{pc} - h_{eff}}{2}\right)^2}{\alpha_e} \right) + I_y + A_a (D_s + D_{pc} + t_p - z - 1 - y_e)^2. \quad (B.5)$$

Para o pavimento tipo II-a, IFB tipo B tem-se

$$I_c = b_{eff} (D_{pc} + D_s - h_{eff}) \left(\frac{(D_{pc} + D_s - h_{eff})^2}{12} + \frac{\left(y_e - \frac{D_s + D_{pc} - h_{eff}}{2}\right)^2}{\alpha_e} \right) + I_y + A_a (D_s + D_{pc} + t_f - z - 1 - y_e)^2 \quad (B.6)$$

B.1.3 Zona 3

Para a linha neutra plástica posicionada na zona 3, a expressão de cálculo é igual à considerada para a zona 2 (Equação (B.3)).

O momento de inércia (I_c) é determinado através das expressões (B.5) e (B.6).

B.2 Pavimento I-b e II-b

As expressões utilizadas para este tipo de pavimentos são iguais às definidas na Secção B.1.

B.3 Pavimento II-b sem conectores

Para uma viga IFB do tipo A, o cálculo da posição da linha neutra elástica é realizado através de

$$y_e = \frac{\frac{A_a z_2 + D_d b_p \left(h_{eff} - \frac{D_d}{2}\right)}{\alpha_e} + \frac{D_s b_{eff} \left(\frac{D_s}{2} - (D_s + D_d - h_{eff})\right)}{\alpha_e}}{A_a + \frac{D_d b_p + D_s b_{eff}}{\alpha_e}}. \quad (B.7)$$

O momento de inércia é dado por

$$I_c = I_y + A_a (z_2 - y_e)^2 + \frac{D_s b_{eff} \left(\frac{D_s}{2} - (D_s + D_d - h_{eff}) - y_e\right)^2}{\alpha_e} + \frac{D_s b_{eff} D_s^2}{12 \alpha_e} + \frac{D_d b_p \left(h_{eff} - \frac{D_d}{2} - y_e\right)^2}{\alpha_e} + \frac{D_d b_p D_d^2}{12 \alpha_e}. \quad (B.8)$$

Para uma viga IFB do tipo B, o cálculo da posição da linha neutra elástica é realizado através de

$$y_e = \frac{A_a z_2 + \frac{D_d b \left(h_{eff} - \frac{D_d}{2} \right)}{\alpha_e} + \frac{D_s b_{eff} \left(\frac{D_s}{2} - (D_s + D_d - h_{eff}) \right)}{\alpha_e}}{A_a + \frac{D_d b + D_s b_{eff}}{\alpha_e}}. \quad (B.9)$$

O momento de inércia é dado por

$$I_c = I_y + A_a (z_2 - y_e)^2 + \frac{D_s b_{eff} \left(\frac{D_s}{2} - (D_s + D_d - h_{eff}) - y_e \right)^2}{\alpha_e} + \frac{D_s b_{eff} D_s^2}{12 \alpha_e} \\ + \frac{D_d b \left(h_{eff} - \frac{D_d}{2} - y_e \right)^2}{\alpha_e} + \frac{D_d b D_d^2}{12 \alpha_e}. \quad (B.10)$$